



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio del daño por humedad en mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos

Treball realitzat per:

Cristina Aguado Díaz

Dirigit per:

Marilda Barra Bizinotto

Rodrigo Miró Recasens

Tutor extern:

Diego Fernando Aponte

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 17 de junio de 2015

Departament de Materials i Infraestructures del transport

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

Me gustaría dedicar unas líneas para agradecer a todas aquellas personas que han hecho posible que esta tesina se llevara a cabo de la mejor manera posible.

En primer lugar a Diego F. Aponte, tutor externo de la tesina, por la ayuda incomparable y el apoyo en todo momento.

A los tutores Dra. Marilda Barra y Dr. Rodrigo Miró, por darme la oportunidad de poder trabajar en este proyecto y de aprender una forma de trabajo que, de otro modo, no hubiera sido posible. Gracias también por permitirme el acceso a los laboratorios que han sido necesarios para ello.

Al jefe del laboratorio de mezclas asfálticas del laboratorio de Camins de la UPC; José Amorós, por su ayuda a la hora de realizar los ensayos y la confianza depositada en mí al dejarme utilizar los espacios y equipos necesarios de su laboratorio.

A mis padres y a mi pareja, por su apoyo incondicional cuando más falta me hacía.

Resumen

La siguiente tesina se enmarca dentro del conjunto de los estudios de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona de la UPC, que buscan la introducción de los áridos siderúrgicos en la fabricación de mezclas asfálticas para capas de rodadura de firmes de carreteras.

En concreto, este estudio tiene como objeto determinar la viabilidad del árido siderúrgico para su uso en capas de rodadura en función del daño causado por unas condiciones de humedad impuestas.

Para evaluar el daño por humedad se han fabricado probetas de una mezcla bituminosa abierta a partir de una muestra recogida de un tramo experimental construido en la provincia de Barcelona. Estas probetas se han sometido a unas condiciones adversas de humedad y temperatura (fueron sometidas a varios ciclos de humedad-sequedad a las temperaturas de 20°C, 30°C y 40°C).

Posteriormente, las propiedades mecánicas de las probetas fueron analizadas mediante los ensayos de módulo resiliente, tracción indirecta y fénix.

Además del estudio de las propiedades mecánicas, se he llevado a cabo un análisis de la interfase árido-betún y del daño causado en ésta por efecto de la humedad. Este análisis se ha realizado a través de un escáner de alta resolución y se han seleccionado algunas muestras para analizarlas mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), obteniendo así unos resultados mucho más precisos.

Palabras clave: mezclas bituminosas porosas, árido siderúrgico, daño por humedad, interfase.

Abstract

The following dissertation is part of the studies undertaken by the College of Civil Engineering of Barcelona with the aim of introducing the steel slag aggregate in road construction.

This study seeks the viability of using the steel slag as an aggregate in road pavement as well as the vulnerability of the steel slag asphalt mixes to moisture conditions.

In order to evaluate the moisture damage, a set of specimens were made using a material sample taken from an experimental stretch built in Barcelona region. The specimens underwent to adverse moisture and temperature conditions (they underwent to some wet-dry cycles at 20°C, 30°C and 40°C).

After that, mechanical properties of the specimens were measured using different tests: resilient modulus test, indirect tensile strength test and flex test.

Apart from the mechanical properties study, a mastic-aggregate interface analysis took place. The aim of this analysis was discovering the damage caused by the adverse moisture conditions. The interface study was carried out using a high resolution scanner. Then, a few specimens were selected to analyze them using a scanning electron microscope (SEM) in order to obtain more precise results.

Keywords: porous asphalt mixes, steel slag, moisture damage, interface.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
Capítulo 3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	4
3.1. Introducción	4
3.2. Firme	4
3.3. Mezcla bituminosa	5
3.4. Mezcla bituminosa discontinua	7
3.4.1. Designación de la mezcla	8
3.5. Mezclas bituminosas en capas de rodadura	8
3.5.1. Características generales de las mezclas bituminosas para capas de rodadura	8
3.6. Componentes de una mezcla bituminosa	10
3.6.1. Ligante hidrocarbonado	10
3.6.2. Árido	10
3.7. Árido siderúrgico	11
3.7.1. Proceso de generación de las escorias	11
3.7.2. Producción en España	12
3.7.3. Escorias blancas	13
3.7.4. Escorias negras	13
3.8. Sensibilidad agua	17
3.8.1. Mecanismos de rotura por humedad	19
3.8.2. Humedad en áridos siderúrgicos	21

Capítulo 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA	23
4.1. Toma de muestras	23
4.1.1. Granulometría de la muestra	23
4.2. Fabricación y plan de trabajo	26
4.2.1. Fabricación de las probetas	26
4.2.2. Plan de trabajo	27
4.3. Ensayos realizados	28
4.3.1. Densidad	28
4.3.1.1. Densidad aparente de la probeta	28
4.3.1.2. Densidad máxima de la mezcla	29
4.3.2. Volumen de huecos	30
4.3.3. Módulo resiliente	30
4.3.4. Tracción indirecta	33
4.3.4.1. Tracción indirecta en las probetas de “condición 0”	34
4.3.5. Fénix	34
4.4. Análisis de la interfase árido–betún	38
4.4.1. Análisis visual de la interfase	39
4.4.2. Escáner de alta resolución de las probetas	39
4.4.2.1. Preparación de las muestras	40
4.4.2.2. Escaneado de las muestras prismáticas	41
4.4.3. Microscopia electrónica de barrido	41
4.4.3.1. Principios básicos de funcionamiento de un SEM	42
4.4.3.2. Preparación de las muestras	43
4.4.3.3. Estudio con microscopio electrónico de barrido	43
Capítulo 5. RESULTADOS Y COMENTARIOS	45
5.1. Introducción	45
5.2. Densidad y contenido de huecos	45

5.3. Ensayos de módulo resiliente	47
5.4. Ensayos de tracción indirecta	50
5.5. Ensayos Fénix.....	53
5.6. Análisis visual de la interfase árido–betún	61
5.7. Escáner de alta resolución de las probetas	62
5.8. Microscopía electrónica de barrido	65
Capítulo 6. CONCLUSIONES	70
Capítulo 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESIGACIÓN	72
Referencias bibliográficas	73
Normativa consultada	77

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificaciones de las mezclas bituminosas (Kraemer, y otros, 2004).....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2. Espesor de capas de mezcla bituminosa en caliente (norma 6.1-IC Sección de firme).....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3. Producción anual de escorias de acería. (CEDEX , 2013)</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 4. Composición química de los áridos procedentes de escorias blancas (CEDEX , 2013)</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 5. Composición química de las escorias negras de acería (CEDEX , 2013)</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 6. Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias negras (CEDEX , 2013)</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 7. Dosificación de la mezcla con árido siderúrgico utilizada para los ensayos.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 8. Distribución de probetas en los baños y uso para ensayos.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 9. Distribución de las probetas para los ensayos en la "Condición 0".....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 10. Probetas dedicadas al escáner de alta resolución.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11. Probetas dedicadas al estudio mediante microscopía electrónica.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 12. Imágenes de la superficie de fractura de varias probetas</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 13. Imágenes de escáner de las probetas de 4 ciclos según la temperatura.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 14. Imágenes de escáner de las probetas de 8 ciclos según la temperatura.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 15. Imágenes de escáner de las probetas de 12 ciclos según la temperatura.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 16. Imágenes del SEM de las probetas sometidas a 4 ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 4°C.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 17. Imágenes del SEM de las probetas sometidas a 8 ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 40°C.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 18. Imágenes del SEM de las probetas sometidas a 12 ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 40°C.....</i>	<i>69</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Usos de escorias en España en 2012 (UNESID, 2013).</i>	2
<i>Figura 2. Croquis de las capas horizontales que forman el perfil de una vía. (LM INGECON, 2014)</i>	5
<i>Figura 3. Esquema del funcionamiento de un Horno de Arco Eléctrico (METFUSION, 2013).</i>	12
<i>Figura 4. Aspecto del árido siderúrgico procedente de escorias negras (fuente propia)</i>	15
<i>Figura 5. Fuentes de humedad en pavimentos (Sanducci, 2002)</i>	17
<i>Figura 6. Cohesión y rotura por cohesión (a) y adherencia y rotura por adherencia (b) (Darvish Poulikakos, 2011)</i>	18
<i>Figura 7. Rotura por adhesividad frente a cohesión según el grosor de la capa asfáltica (TBR, 2003).</i>	18
<i>Figura 8. Rotura por adherencia o por cohesión (Coring, 2003).</i>	19
<i>Figura 9. Clasificación de los huecos en mezclas asfálticas (Caro Espinel, 2009).</i>	20
<i>Figura 10. Dos posibles mecanismos de daño por humedad bajo las mismas condiciones: a) presión en los poros provoca micro-roturas y desplazamiento, y b) la difusión de la humedad provoca disgregación entre árido-betún (Caro Espinel, 2009).</i>	21
<i>Figura 11. Situación de los tramos de recogida de muestras.</i>	23
<i>Figura 12. Granulometría de la mezcla bituminosa (Barra Bizinotto D. M., 2013)</i>	24
<i>Figura 13. Curva granulométrica de las fracciones de áridos para la MB (Barra Bizinotto D. M., 2013).</i>	25
<i>Figura 14. Curva de combinación en peso de los materiales dosificados para la mezcla bituminosa (Barra Bizinotto D. M., 2013).</i>	25
<i>Figura 15. Curva de combinación rectificada en volumen de los materiales dosificados para la mezcla bituminosa (Barra Bizinotto D. M., 2013)</i>	25
<i>Figura 16. Probeta cilíndrica (Cortés, 2014)</i>	27
<i>Figura 17. Montaje del ensayo de módulo de rigidez</i>	31
<i>Figura 18. Esquema de montaje de la prensa de ensayo.</i>	33
<i>Figura 19. Probeta cortada para ensayo fénix (Cortés, 2014).</i>	35
<i>Figura 20. Preparación de la probeta para el ensayo fénix (Pérez-Jiménez, Botella, Martínez, & Miró, 2013)</i>	35

<i>Figura 21. Valores representativos de la curva fuerza–desplazamiento del ensayo fénix (Cortés, 2014).</i>	38
<i>Figura 22. Imagen de la superficie de fractura de media probeta ensayada a fénix.</i>	39
<i>Figura 23. Imagen de la superficie de fractura de una probeta ensayada a tracción indirecta.</i>	39
<i>Figura 24. Escaneado de muestra.</i>	41
<i>Figura 25. Imagen post–procesada después del escaneado mostrando los huecos.</i>	41
<i>Figura 26. Microscopio SEM.</i>	42
<i>Figura 27. Vista de la cámara de un SEM.</i>	42
<i>Figura 28. Microscopio SEM con equipo de visión.</i>	42
<i>Figura 29 y Figura 30. Ejemplos de imágenes generadas por un microscopio electrónico de barrido (SEM).</i>	44
<i>Figura 31. Densidades de las probetas fabricadas.</i>	46
<i>Figura 32. Tanto por ciento de huecos de las probetas ensayadas.</i>	46
<i>Figura 33. Densidades en función del número de ciclos.</i>	47
<i>Figura 34. Módulo resiliente en función del número de ciclos.</i>	47
<i>Figura 35. Módulo resiliente en función del número de ciclos a una temperatura de 20°C.</i>	48
<i>Figura 36. Módulo resiliente en función del número de ciclos a una temperatura de 30°C.</i>	48
<i>Figura 37. Módulo resiliente en función del número de ciclos a una temperatura de 40°C.</i>	48
<i>Figura 38. Módulo resiliente de las probetas sometida a 4 ciclos de humedad–sequedad, en función de la temperatura.</i>	50
<i>Figura 39. Módulo resiliente de las probetas sometida a 8 ciclos de humedad–sequedad, en función de la temperatura.</i>	50
<i>Figura 40. Módulo resiliente de las probetas sometida a 12 ciclos de humedad–sequedad, en función de la temperatura.</i>	50
<i>Figura 41. Resultado del ensayo de tracción indirecta en las probetas de la “condición 0” en seco.</i>	51
<i>Figura 42. Resultado del ensayo de tracción indirecta en las probetas de la “condición 0” después de un ciclo de humedad–sequedad.</i>	51

<i>Figura 43. Resistencia a tracción indirecta en las probetas de la condición inicial, tanto las que no han sufrido ninguna alteración como las que se han sometido a un ciclo de humedad, sequedad.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 44. Resistencia a tracción indirecta en función del número de ciclos.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 45. Resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura a la que han sido sometidas las probetas.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 46. Curva del ensayo fénix de las probetas de “condición 0” a una temperatura de 5°C.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 47. Curva del ensayo fénix de las probetas de “condición 0” a una temperatura de 20°C.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 48. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según el número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 49. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según el número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 50. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°C, según el número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 51. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0. ..</i>	<i>55</i>
<i>Figura 52. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 53. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a 12 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0. ..</i>	<i>55</i>
<i>Figura 54. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 55. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 56. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°Csegún cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 57. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.</i>	<i>57</i>

Figura 58. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.....	57
Figura 59. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.....	57
Figura 60. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.....	58
Figura 61. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.....	58
Figura 62. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.....	58
Figura 63. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.....	58
Figura 64. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.....	59
Figura 65. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a 12 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0. ..	59
Figura 66. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.	60
Figura 67. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.	60
Figura 68. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.	60
Figura 69. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.....	60
Figura 70. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.....	60

Figura 71. Curva “energía de fractura-IR T 25-50” para probetas que se han sometido a 12 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.....	60
--	----

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de fabricación del acero, se genera un gran volumen de residuos. Estos residuos provocan un impacto ambiental importante y elevados costes de gestión a la hora de alcanzar su destino final, los vertederos.

No obstante, hay una alternativa muy atractiva que alarga la vida de las escorias procedentes de las fundiciones de acero: el reciclaje. Los residuos de acería pueden utilizarse, entre otros usos, para la obtención de áridos para la industria de la construcción (áridos siderúrgicos); tanto para la fabricación de hormigones como para la de mezclas asfálticas (CEDEX , 2013).

El correcto tratamiento de estos materiales supone una serie de beneficios de carácter global, tanto desde el punto de vista de sus generadores como desde el punto de vista social. Para el sector industrial supone una disminución de los costes de vertido, a la vez que un ahorro de materia prima natural derivado de la reutilización de los subproductos de acería. Por otro lado, se reduce el impacto ambiental al mantener los vertederos si ocupar. Desde el punto de vista de la sociedad, se produce un aumento de la calidad de vida en los alrededores de estas industrias (CEDEX , 2013).

En Europa, aproximadamente 12 toneladas de árido siderúrgico se producen cada año. Debido al intenso trabajo de investigación de los últimos 30 años, el 65% de la escoria de acería se reutiliza en campos específicos relacionados con todo tipo de industrias. Sin embargo, el porcentaje de reutilización de escoria varía en cada país de la UE. En Alemania, por ejemplo, llega al 93% (Motz & Geiseler, 2001).

Por otro lado, Estados Unidos produce cada año 7,5 millones de toneladas de escoria siderúrgica que se reinvierten principalmente como capa granular de carreteras o como árido en la construcción. El uso de escoria de árido siderúrgico también ha tenido éxito en Oriente Medio, bajo condiciones de elevadas temperaturas (Ibrahim M. Asi, 2007).

En España, existen actualmente 24 acerías de horno eléctrico de arco, que producen una media de 2 millones de toneladas de escorias cada año (CEDEX , 2013). El 23% de estas escorias se almacena en vertederos, mientras que el 77% se aprovechan para otros usos. Entre los usos de las escorias siderúrgicas en España destacan la producción de cemento (25% de las escorias de acería) y la construcción de carreteras (26% de las escorias). Otros usos para los que se destina una menor cantidad de escorias son la producción de fertilizantes, creación de pistas forestales o almacenamiento interno en las industrias siderúrgicas (*Figura 1*).

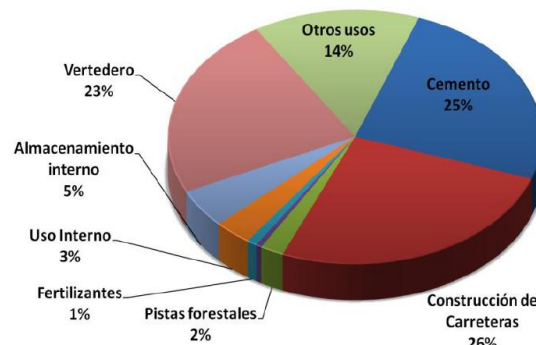


Figura 1. Usos de escorias en España en 2012 (UNESID, 2013).

Por lo tanto, se puede ver que uno de los usos más extendido en el entorno de la obra civil es el de la fabricación de mezclas asfálticas con áridos siderúrgicos. Tanto en España como a nivel mundial se han llevado a cabo numerosos estudios científicos y técnicos para establecer las características de este tipo de material y la viabilidad de su utilización en la construcción de carreteras (Ibrahim M. Asi, 2007) (Asi, Qasrawi, & Shalabi, 2007) (Hainin, y otros, 2012).

En este contexto, la presente tesina se centra en el estudio de la afectación de la humedad a mezclas asfálticas con áridos siderúrgicos y en la comprobación así en este ámbito la viabilidad para su uso como capas de rodadura de firmes de carretera.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El presente trabajo trata de realizar un estudio sobre la sensibilidad al agua que sufren las mezclas bituminosas para capas de rodadura fabricadas con árido siderúrgico. Se estudia el daño causado en la interfase árido–ligante de probetas sometidas a situaciones adversas de humedad y temperatura.

2.2. Objetivos específicos

Para llevar a cabo el objetivo general, se han seguido los pasos presentados a continuación:

- Fabricar probetas de mezcla asfáltica que incluye árido siderúrgico.
- Introducir las probetas en una serie de ciclos de humedad–sequedad a diferentes temperaturas (4 ciclos, 8 ciclos y 12 ciclos a 20°C, 30°C y 40°C).
- Evaluar las capacidades físicas y mecánicas de las probetas sometidas a condiciones adversas de humedad y temperatura a través de la realización de diferentes ensayos (módulo resiliente, tracción indirecta y fénix), así como la comparación con los resultados obtenidos de muestras que no han sido sometidas a ningún tipo de daño.
- Analizar mediante escáner de alta resolución y microscopía electrónica de barrido los daños sufridos en la interfase árido–ligante a una escala no apreciable por el ojo humano.

Capítulo 3

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1. Introducción

En este capítulo se realizará un repaso a la documentación existente relacionada con el tema objeto de nuestro estudio. Se verá lo que otros autores de distintas partes del mundo han investigado sobre la interacción de firmes con la humedad y las conclusiones a las que ellos han llegado.

Por otro lado, se detallarán los conceptos acerca de los firmes y su composición, así como de los áridos siderúrgicos y sus características.

3.2. Firme

El firme es la superficie de una vía. Está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor de diferentes materiales adecuadamente compactados (Kraemer, y otros, 2004).

Estas estructuras estratificadas se apoyan en la explanada (infraestructura) y han de poder soportar las cargas del tráfico durante un período de varios años sin deterioros que afecten a la seguridad, a la comodidad de los usuarios o a la propia integridad del firme o de la explanada (Kraemer, y otros, 2004).

Actualmente existen gran variedad de firmes, que siguiendo unos criterios tradicionales, suele clasificarse en dos grandes grupos: firmes flexibles y firmes rígidos. Los *firmes rígidos* tienen una capa de hormigón que asegura la función resistente. Los firmes flexibles, en cambio, están formados por una serie de capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación que usualmente es decreciente con la profundidad. Los firmes flexibles tienen, al menos, una capa de rodadura bituminosa (Kraemer, y otros, 2004).

Las capas que constituyen los firmes son las que se detallan brevemente a continuación y se esquematizan en la *Figura 2*.

- *Pavimento*: es la parte superior del firme y la que recibe directamente las solicitaciones del tráfico. Los pavimentos más comunes empleados en carreteras con intensidades de tráfico medias y altas y en vías urbanas son las mezclas bituminosas. Los pavimentos se subdividen en dos capas:
 - *Capa de rodadura*: proporciona las características funcionales de la vía, que garantizan la seguridad y comodidad de los usuarios.
 - *Capa intermedia*: aparece inmediatamente inferior a la capa de rodadura cuando el espesor del pavimento debe ser superior a 8cm. La capa de rodadura y la intermedia presentan diferencias de composición, particularmente en lo que se refiere a la resistencia al pulimiento del árido grueso.
- *Base*: es la capa del firme situada debajo del pavimento. Su función es eminentemente resistente, absorbiendo la parte de los esfuerzos verticales.
- *Subbase*: es la capa del firme situada debajo de la base y sobre la explanada. Esta capa puede ser no necesaria con explanadas de elevada capacidad de soporte.

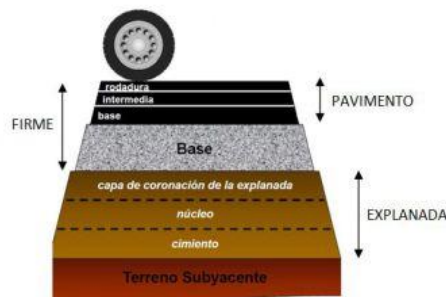


Figura 2. Croquis de las capas horizontales que forman el perfil de una vía. (LM INGECON, 2014)

3.3. Mezcla bituminosa

Se define como mezcla bituminosa la combinación de un *ligante hidrocarbonado*, *áridos* (incluido el *polvo mineral*) con granulometría continua o discontinua y, eventualmente, *aditivos*, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante (Fistric, Strineka, & Roskovic, 2010) (Dirección General de Carreteras, 2011).

Las mezclas bituminosas pueden ser de diferentes tipos en función de diversos parámetros de clasificación *Tabla 1*.

Tabla 1. Clasificaciones de las mezclas bituminosas (Kraemer, y otros, 2004)

<i>Parámetros de clasificación</i>	<i>Tipo de mezcla</i>
<i>Fracciones de árido empleadas</i>	Masilla Mortero Hormigón Macadam
<i>Temperatura de puesta en obra</i>	En frío En caliente
<i>Huecos en mezcla (h)</i>	Cerradas ($h < 6$ por 100) Semicerradas ($6 \text{ por } 100 < h < 12$ por 100) Abiertas ($h > 12$ por 100) Porosas ($h \text{ por } 100 > 20$ por 100)
<i>Tamaño máximo del árido ($t_{\text{máx.}}$)</i>	Gruesas ($t_{\text{máx}} > 10$ mm) Finas ($t_{\text{máx}} < 10$ mm)
<i>Estructura del árido</i>	Con esqueleto mineral Sin esqueleto mineral
<i>Granulometría</i>	Continuas Discontinuas

Combinando estos criterios de clasificación, se podrían obtener numerosos tipos de mezclas. Sin embargo, no todos esos tipos tienen el mismo grado de utilización. Los más empleados en la actualidad son (Kraemer, y otros, 2004):

- *Hormigones bituminosos en caliente*: tipo más generalizado para todo tipo de vías.
- *Mezclas en frío*: principal campo de aplicación es la construcción y reparación de carreteras secundarias.
- *Mezclas porosas o drenantes*: se emplean principalmente como capas de rodadura en autopistas y otras vías de circulación rápida.
- *Microaglomerados*: mezclas con un tamaño máximo limitado del árido que permite aplicarlas en pequeño espesor.
- *Mezclas sin esqueleto mineral*: mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante. Los asfaltos fundidos son un ejemplo de este tipo de mezcla, que se utilizan en tableros de puentes y en vías urbanas de los países con un clima frío y húmedo, ya que son mezclas impermeables.

- *Mezclas de alto módulo para capas de base:* se utilizan en capas de espesores entre 8 y 15 cm tanto para rehabilitaciones como para la construcción de firmes nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta:

Las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso se definen en una primera instancia de la misma forma que las mezclas bituminosas; es decir, es la combinación de un *ligante hidrocarbonado*, *áridos* (incluido el *polvo mineral*) con granulometría continua o discontinua y, eventualmente, *aditivos*, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Sin embargo, su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente (Dirección General de Carreteras, 2011).

Para capas de rodadura se utilizarán mezclas en caliente tipo hormigón asfáltico de granulometría continua (tipos semidenso y denso o cerradas y semicerradas), drenantes (tipo PA) y discontinuas (tipos F y M), según la norma 6.1-IC Sección de firme (Orden FOM 3460/2003), en función del espesor de la capa y la categoría de tráfico pesado de la vía (Tabla 2).

Tabla 2. Espesor de capas de mezcla bituminosa en caliente (norma 6.1-IC Sección de firme)

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE PESO		
		T00 a T1	T2 y T31	T32 y T4 (T41 y T42)
Rodadura	PA	4		-
	M	3	2-3	
	F	-		
	D y S	-	6-5	5

3.4. Mezcla bituminosa discontinua

Debido al estudio que se llevará a cabo posteriormente en este trabajo, se va a analizar con un poco más de detalle la definición y designación de las mezclas discontinuas.

Las mezclas bituminosas discontinuas son aquellas cuyos áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso. Se distinguen dos tipos de mezclas bituminosas discontinuas con dos husos

granulométricos con tamaño máximo nominal de ocho y once milímetros (8 y 11 mm, que da lugar a las nomenclaturas BBTM 8A/B y BBTM 11A/B) cada uno. Con cada huso granulométrico podrán fabricarse mezclas bituminosas discontinuas en caliente, para capas de rodadura de dos a tres centímetros de espesor (Dirección General de Carreteras, 2011).

Estas mezclas se caracterizan por tener un contenido de huecos comprendido entre el 12-20% del volumen total de la mezcla bituminosa.

3.4.1. Designación de la mezcla

Según el PG3, la designación de la mezcla se hará según la nomenclatura establecida en la UNE-EN 13108-2, siguiendo el siguiente esquema:

BBTM	D	Clase	ligante
------	---	-------	---------

dónde:

- BBTM: Indica que la mezcla bituminosa es de tipo discontinuo
- D: Tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un 90% y un 100% del total del árido
- Clase: Indica si la clase es A o B, en función de la dotación de betún y la proporción filler/betún.
- ligante: Se incluye la designación del tipo de ligante hidrocarbonado utilizado

3.5. Mezclas bituminosas en capas de rodadura

En este subapartado se hablará de las características principales que debe satisfacer la capa de rodadura, puesto que es la capa objeto de estudio en esta tesina.

Como ya se ha comentado en el apartado “3.2.Firme”, la capa de rodadura es la capa más superficial del pavimento. Es la que proporciona las características funcionales de la vía, que garantizan la seguridad y comodidad de los usuarios. Es por esto, que se deben satisfacer una serie de características.

3.5.1. Características generales de las mezclas bituminosas para capas de rodadura

La primera característica que debe tener una mezcla bituminosa es la *estabilidad*, es decir, la capacidad de soportar cargas y resistir las tensiones producidas con unas deformaciones tolerables. Esta propiedad representa la resistencia intrínseca del material,

en otras palabras, la combinación de su rozamiento interno y de su cohesión (Kraemer, y otros, 2004).

Por otro lado, se tienen que tener en cuenta una serie de características a la hora de proyectar y construir las mezclas bituminosas para capas de rodadura (Kraemer, y otros, 2004):

- *Resistencia a las deformaciones plásticas:* en condiciones de altas temperaturas o bajas velocidades de aplicación de las cargas, puede producirse una acumulación de deformaciones plásticas o fluencia del material. La manifestación más típica es la aparición de roderas.
- *Resistencia a la disgregación:* en mezclas con un importante esqueleto mineral, los esfuerzos transmitidos por los vehículos pueden provocar una disgregación de la mezcla con un desprendimiento progresivo del material.
- *Resistencia a la fatiga:* el paso repetido de unas cargas con un valor inferior al de rotura en unas condiciones de baja temperatura y elevada velocidad de aplicación de la carga producen un agotamiento progresivo del material por fatiga, que puede provocar un agrietamiento generalizado.
- *Flexibilidad:* las mezclas que se extiendan sobre un soporte flexible y que sean de un espesor inferior a 12 cm, deben tener también una flexibilidad suficiente para que no se rompan ni se fatiguen con excesiva rapidez.
- *Resistencia al deslizamiento:* las mezclas empleadas en capas de rodadura deben proporcionar una suficiente resistencia al deslizamiento que debe mantenerse en el tiempo.
- *Impermeabilidad y permeabilidad:* las capas superiores deben cumplir la función de proteger la infraestructura frente a la acción del agua que cae sobre la plataforma. En consecuencia, se debe dotar a las mezclas de una elevada impermeabilidad. Sin embargo, esta impermeabilidad no tiene por qué estar en la capa de rodadura, si se utilizan mezclas porosas o drenantes, la impermeabilidad se garantizará en la capa inmediatamente inferior.
- *Durabilidad:* el envejecimiento de las mezclas bituminosas se debe al desencadenamiento de procesos físicos y químicos producidos por unas agresiones externas de diversa índole. El envejeciendo se manifiesta por microfisuras, pérdidas de mortero, migraciones de ligante, desplazamiento del ligante de la superficie del árido grueso, etc. Pueden aparecer así deterioros diversos como baches, superficies

averrugadas, peladuras, etc. En cualquier caso, la duración de una capa de rodadura correctamente proyectada y construida debería ser de diez años o más.

Además, en las capas de rodadura las mezclas deben satisfacer también unos *requerimientos superficiales* en consonancia con su función y con el entorno. Por ello, hay que valorar, además de las propiedades que se detallan a continuación, otras como la textura superficial, la luminosidad, el color, la sonoridad, la facilidad para ser pintadas, la facilidad de limpieza, etc.

3.6. Componentes de una mezcla bituminosa

Como ya se ha mencionado anteriormente (apartado “3.3 Mezcla bituminosa”), los componentes de una mezcla bituminosa son un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y, eventualmente, aditivos.

3.6.1. Ligante hidrocarbonado

Los ligantes se caracterizan por tener unas propiedades aglomerantes que se ponen de manifiesto al entrar en contacto con las partículas minerales de los áridos. Existen dos grandes grupos. Por un lado existen ligantes hidrocarbonados, que son los más específicos de carreteras; por otro lado tenemos las cales aéreas y los conglomerantes hidráulicos y puzolánicos, que tienen un uso generalizado en la ingeniería civil (Kraemer, y otros, 2004). Nuestro interés se centra en los primeros mencionados puesto que son los utilizados para la fabricación de capas de rodadura.

Los ligantes hidrocarbonados empleados en carreteras son principalmente los betunes asfálticos.

En aquellas situaciones en las que se necesite mejorar las características ofrecidas por los ligantes bituminosos, pueden utilizarse aditivos, obteniendo así ligantes modificados. De esta manera, se mejora su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura o de velocidad de aplicación de las cargas.

3.6.2. Árido

Los áridos que conforman las capas de un firme son los elementos de naturaleza pétreo presentes en una proporción muy elevada en estas capas. Son los encargados de

aportar el rozamiento interno, componente fundamental de la resistencia. En este aspecto, se hace referencia habitualmente al esqueleto mineral (Kraemer, y otros, 2004).

Según el PG-3, los áridos se clasifican según su tamaño como:

- *Polvo mineral*: se define como la parte del árido total cernida por el tamiz 0,063 mm de la UNE-EN 933-2.
- *Áridos finos*: se definen como la parte del árido total cernida por el tamiz 2 mm y retenida por el tamiz 0,063 de la UNE-EN 933-2.
- *Árido grueso*: se define como la parte del árido total retenida en el tamiz 2 mm de la UNE-EN 933-2.

Los áridos pueden ser de multitud de procedencias, pero para su uso en construcción de firmes deben cumplirse las especificaciones técnicas que aparecen en los artículos 542 y 543 del PG-3.

Según su procedencia, los áridos se clasifican en calizos, silíceos e ígneos y metamórficos. Sin embargo, también pueden utilizarse materiales reciclados, como es el caso del árido siderúrgico.

3.7. Árido siderúrgico

La escoria de acero es un subproducto de la fabricación del acero. Se produce durante la separación del acero fundido de sus impurezas en los hornos de fabricación del acero. La escoria se desarrolla como un líquido fundido que se compone de una solución compleja de silicatos y óxidos que se solidifica al enfriarse (CEDEX , 2013). La escoria de acero es un material reciclado que puede utilizarse en el sector de la construcción (Ibrahim M. Asi, 2007) (Motz & Geiseler, 2001).

3.7.1. Proceso de generación de las escorias

La principal materia prima que se utiliza en la elaboración de acero en horno de arco eléctrico (EAF¹) es la chatarra de hierro dulce² o de acero. El proceso de fabricación del acero en las acerías de alto horno eléctrico se compone de dos etapas (CEDEX , 2013):

¹ EAF: del inglés *Electric Arc Furnace*.

- *Etapa de fusión (metalurgia primaria):* etapa realizada en EAF en la que se produce la fusión de las materias primas. En esta etapa se producen una serie de procesos como la *oxidación*, dirigida a eliminar las impurezas de magnesio y silicio, la *defosforación* y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas. Al final de todas estas fases se extraen las escorias negras.
- *Etapa de afino del baño fundido (metalurgia secundaria):* esta etapa se inicia en el EAF y finaliza en la cuchara. Incluye la *desoxidación*, que permite eliminar los óxidos metálicos del baño, la *desulfuración* y la *descarburación* del acero. Durante esta fase se producen y eliminan las escorias blancas para finalmente obtener el acero.

En la *Figura 3* se esquematiza el funcionamiento de un horno de arco eléctrico.

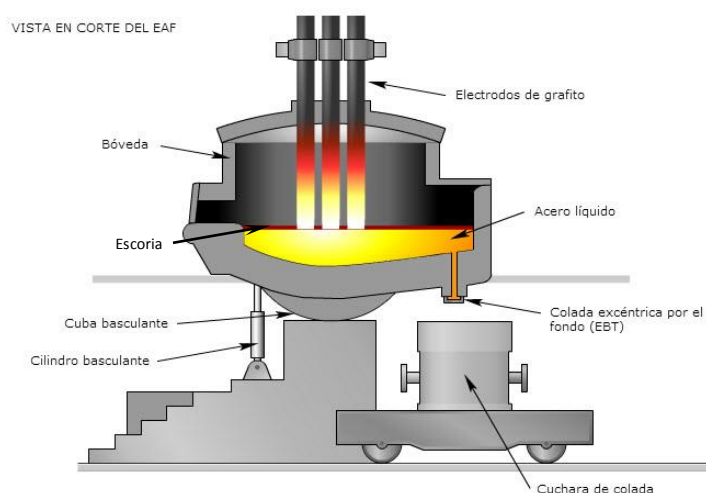


Figura 3. Esquema del funcionamiento de un Horno de Arco Eléctrico (METFUSION, 2013).

3.7.2. Producción en España

En España se producen cada año 24,8 millones de toneladas de acero (CEDEX , 2013). La cantidad de escorias producidas es la que se observa en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Producción anual de escorias de acería. (CEDEX , 2013)

Producción de acero (103 t)	Generación de escoria kg/t de acero		Producción de escorias (t)
	Escoria negra	110 – 150	1.781.560
13.704	Escoria blanca	20 – 30	342.608

² Hierro dulce: hierro con un contenido de carbono inferior al 0,1%.

3.7.3. Escorias blancas

- Composición

Las escorias blancas se caracterizan por su contenido en metales pesados como cromo, zinc o plomo (inferior al 1%) y el reducido tamaño de sus partículas. La composición química de la escoria blanca es la presentada en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición química de los áridos procedentes de escorias blancas (CEDEX , 2013)

SiO ₂ (%)	17,4 – 19,3	Fluoruro (%)	1,4
Fe ₂ O ₃ (%)	1,1 – 3,6	Sulfuro (mg/kg)	503
FeO (%)	0,0 – 0,95	Zinc (ppm)	596
Al ₂ O ₃ (%)	3,2 – 10,4	Plomo (ppm)	84
CaO (%)	45,3 – 62,1	Cobre (ppm)	200
MgO (%)	4,5 – 17,2	Cromo (ppm)	150
MnO (%)	0,0 – 1,2	Níquel (ppm)	80
S (%)	1,45 – 1,65		
C (%)	0,0 – 0,03		

- Propiedades del material procesado

Las escorias blancas presentan en su composición silicatos tricálcico y bicálcico, aluminoferrito tetracálcico, aluminato tricálcico y ferrito dicálcico.

- Aplicaciones

Las escorias blancas no se utilizan como árido en construcción debido a su composición de los áridos que resultan. Sin embargo, su uso en la estabilización de suelos y como material de construcción de terraplenes está en fase de investigación y desarrollo. Por otro lado, se pueden reutilizar para su uso en cementeras de escoria blanca (CEDEX , 2013).

3.7.4. Escorias negras

- Composición

La composición química de las escorias negras está condicionada por el tipo de chatarra utilizada, pero puede considerarse como representativos los porcentajes recogidos en la Tabla 5.

Tras la extracción de la escoria del horno, debe procederse a su enfriamiento, que puede llevarse a cabo de distintos modos que determinan su porosidad y su estructura. Después del enfriamiento obtenemos áridos procedentes de las escorias negras. Las propiedades físicas de estos áridos son las resumidas en la *Tabla 6*.

Tabla 5. Composición química de las escorias negras de acería (CEDEX , 2013)

	Porcentaje (%)
CaO	22 – 60
SiO ₂	11 – 37
FeO	0,5 – 4
Fe ₂ O ₃	38
MgO	4 – 12
Cr ₂ O ₃	1 – 8
TiO ₂	0,6 – 2
MnO	1 – 4
Al ₂ O ₃	2 – 8
P ₂ O ₆	0 – 0,02

Tabla 6. Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias negras (CEDEX , 2013)

Propiedad	Árido grueso	Árido fino
Tamao (mm)	4,76 – 25,0	0 4,76
Densidad aparente (Mg/m ³)	3,35	3,70
Absorción (&)	3,29	2,84
Porosidad (%)	10,5	–
Desgaste de Los Angeles (%)	≈ 20	–

- **Propiedades del material procesado**



Figura 4. Aspecto del árido siderúrgico procedente de escorias negras (fuente propia)

Los áridos procedentes de las escorias negras (*Figura 4*) de EAF tienen una elevada densidad relativa (entre 3,1 y 4,5) muy por encima de los áridos naturales (CEDEX , 2013). Mientras que la densidad típica de los áridos calizos es de $2,65\text{g/cm}^3$, la densidad de los áridos siderúrgicos está en torno a $3,6\text{ g/cm}^3$.

La absorción de agua presenta en general valores entre 1% y 4% en volumen. Esta absorción puede influir en la durabilidad si el árido va a estar sometido a ciclos de hielo–deshielo o humedad–sequedad (CEDEX , 2013).

Las partículas son duras, con un coeficiente de desgaste Los Ángeles entre 17% y 25% (CEDEX , 2013).

El coeficiente de pulimiento acelerado varía en general entre 50 y 60, cumpliendo los valores exigidos para áridos de mezclas bituminosas en capas de rodadura (CEDEX , 2013).

Por otro lado, debido a la presencia de óxidos de cal y magnesio libre en su composición, las escorias negras de acería tienen naturaleza expansiva. La cal libre se hidrata rápidamente y puede originar grandes cambios de volumen en pocas semanas, mientras que la hidratación del magnesio se produce mucho más lentamente. Por ello, antes de su uso, se aconseja realizar un ensayo de expansión para comprobar que las escorias no van a sufrir ningún problema técnico debido a la presencia de cal y/o magnesio libre (CEDEX , 2013).

- **Aplicaciones**

Los áridos siderúrgicos procesados que tengan el contenido de cal y/o magnesio libre de manera que no sean expansivos se pueden utilizar en ingeniería civil reemplazándolos por el árido convencional (Ibrahim M. Asi, 2007).

Las escorias negras son las que presentan un campo de aplicación más amplio. Algunos ejemplos de los usos que se les pueden dar son los siguientes (CEDEX , 2013):

- Firms de carreteras
- Utilización en cementera de escorias negras
- Utilización de escorias negras como árido para morteros
- Utilización de escorias negras como árido para hormigón

Concretamente en el uso como material para firms de carretera, la escoria de acería puede utilizarse como árido fino o árido grueso en mezclas bituminosas en caliente tanto cerradas como discontinuas y en mezclas bituminosas en frío o tratamientos superficiales. El correcto procesado y un especial control de calidad son extremadamente importantes para seleccionar el árido siderúrgico para su uso en firms (Ibrahim M. Asi, 2007).

Alguno autores plantean que el uso de árido siderúrgico en mezclas bituminosas puede reemplazar tanto al árido fino como al grueso, pero nunca a los dos a la vez, puesto que una mezcla que contuviera el 100% de árido siderúrgico tendría un contenido de huecos muy elevado y problemas de aumento de volumen debido a la forma angulosa de este tipo de árido (Ibrahim M. Asi, 2007).

Se han llevado a cabo numerosas campañas experimentales en toda Europa probando la eficacia en este tipo de áridos para la fabricación de carreteras. De estas campañas se han sacado algunas conclusiones (Motz & Geiseler, 2001):

- La superficie rugosa del material procesado de escoria de acería proporciona una capacidad de carga superior tanto después de compactado como posteriormente que utilizando otro tipo de áridos.
- La lluvia densa no influye en la capacidad de carga en capas inferiores fabricas con árido siderúrgico.
- La solidificación de los carbonatos conlleva un aumento de la capacidad de carga.

- Las capas fabricadas con árido siderúrgico permanecen estables si los requerimientos para la estabilidad volumétrica han sido cumplidos.
- Las capas superficiales permanecen planas bajo condiciones de tráfico pesado.
- La resistencia al pulimiento de las capas superficiales se mantienen en niveles elevados durante un largo periodo de tiempo.
- Las carreteras fabricadas con áridos siderúrgicos ya sea en capas con mezclas bituminosas o sin ellas, no afectan al medio ambiente por lixiviación.

3.8. Sensibilidad agua

La humedad juega un papel muy importante en la degradación de los pavimentos, ya que no sólo es la principal fuente de desmoronamiento de la mezcla, sino que contribuye de manera importante a la aparición de otros problemas. (Caro Espinel, 2009).

Las fuentes de humedad en un pavimento pueden ser externas o internas. El agua puede penetrar por la superficie, lateralmente debido a zonas mal drenadas y/o de capas inferiores cuando el agua subterránea tiene mucha fuerza tal y como se muestra en la *Figura 5*.

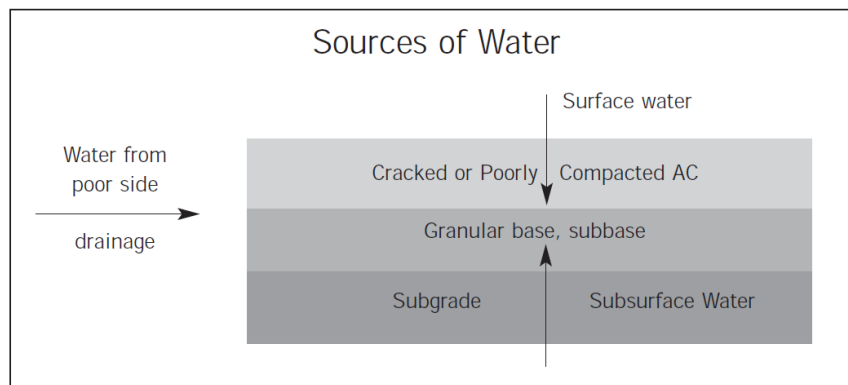


Figura 5. Fuentes de humedad en pavimentos (Sanducci, 2002)

A escala microscópica, la humedad afecta a la estructura interna de las mezclas asfálticas de dos maneras diferentes *Figura 6*:

- *Pérdida de cohesión en el mástico*. Se produce a causa de la rotura de los enlaces entre las moléculas en la capa de ligante (Moraes, Velasquez, & Bahia, 2010)

- *Pérdida de adherencia entre el betón y el árido.* Se produce una rotura entre la unión de las moléculas de diferentes fases (Moraes, Velasquez, & Bahia, 2010).

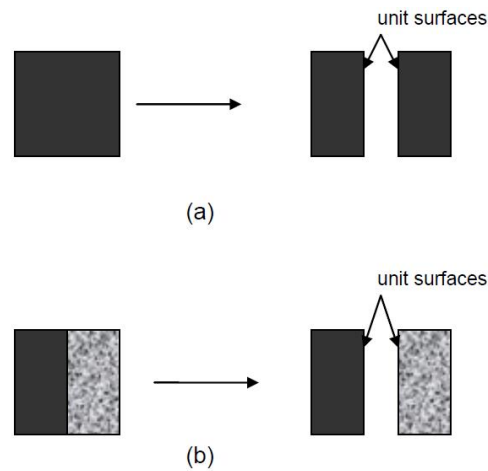


Figura 6. Cohesión y rotura por cohesión (a) y adherencia y rotura por adherencia (b) (Darvish Poulikakos, 2011)

Que ocurra un fallo u otro depende de la naturaleza del mástico y del “grosor” de la película de mástico que envuelve el árido. Tal y como se muestra en la *Figura 7*, cuando este grosor es muy pequeño, la adherencia entre árido–betón determina la resistencia de la mezcla y establece la condición crítica. En cambio, cuando la capa de mástico alrededor del árido es muy gruesa las propiedades cohesivas de éste limitan la resistencia a la rotura (TBR, 2003). En la *Figura 8* se puede ver un esquema de las roturas por cohesión y por adherencia en seco y en condiciones de humedad.

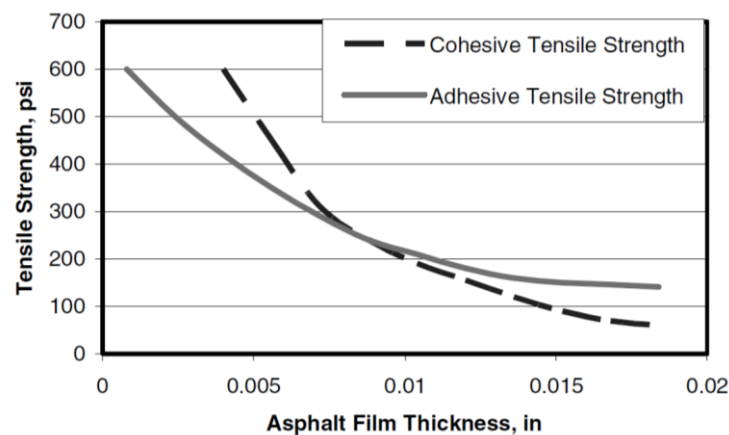


Figura 7. Rotura por adhesividad frente a cohesión según el grosor de la capa asfáltica^{3 4} (TBR, 2003).

³ psi: libra–fuerza por pulgada cuadrada; 1 psi = 6,895 kN/m².

⁴ in: pulgada; 1 in = 25,4 mm.

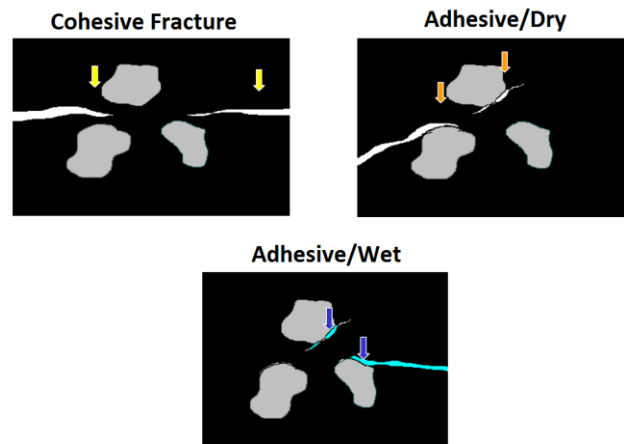


Figura 8. Rotura por adherencia o por cohesión (Coring, 2003).

3.8.1. Mecanismos de rotura por humedad

El daño por humedad en mezclas asfálticas se define como la degradación de las propiedades mecánicas del material debido a la presencia de humedad ya sea en estado líquido o gaseoso (Caro Espinel, 2009).

Un mecanismo de daño es un proceso que genera cambios en las condiciones internas o externas de un sistema y que conduce a un nuevo estado o condición que reduce sus condiciones originales. Un mecanismo de daño por humedad consta de dos pasos:

1. *Proceso de transporte de la humedad:* es el proceso en el que la humedad, en estado líquido o gaseoso, infiltra en el mástico y alcanza la interfase árido-betún.
2. *Respuesta del sistema:* se refiere a los cambios generados en el interior de la mezcla que conllevan a una pérdida de la capacidad portante del material.

Las condiciones físicas, químicas y geométricas de la mezcla controlan las formas de transporte de la humedad en su interior y las respuestas del sistema.

El transporte de la humedad depende de la distribución de huecos de la mezcla. Existe un tamaño medio de hueco, considerado como pésimo, para el que la sensibilidad a la humedad de la mezclas es máxima. Si el tamaño es menor que el tamaño pésimo, se infiltra poca agua en la mezcla; y si éste es mayor, el agua alcanza los huecos internos pero

es fácilmente drenada. Sin embargo, para el tamaño de hueco pésimo, el agua permanece “atrapada” en los huecos y genera condiciones propicias para un daño por humedad (Caro Espinel, 2009). De este modo se han clasificado los huecos en tres categorías: efectiva, semi-efectiva e impermeable. En la *Figura 9* se observa esta clasificación de los huecos en mezclas asfálticas.

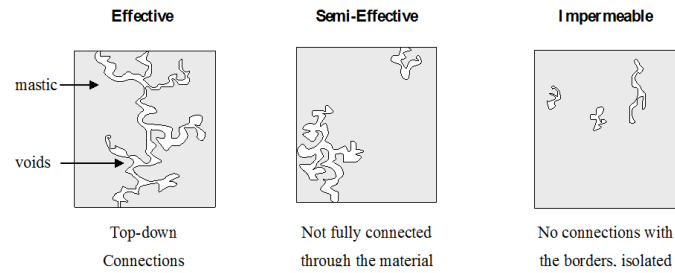


Figura 9. Clasificación de los huecos en mezclas asfálticas (Caro Espinel, 2009).

Posteriormente al transporte de la humedad en el interior de la mezcla, se produce la respuesta del sistema. Históricamente, se han presentado seis mecanismos de daño por humedad. Sin embargo, el daño por humedad no se limita a la aparición de uno solo de estos mecanismos, sino que es una combinación de diferentes procesos (TBR, 2003). Los mencionados mecanismos de rotura son los presentados a continuación:

- *Disgregación (detachment)*: separación de la película de mástico de la superficie del árido debido a una fina película de agua, sin ninguna rotura obvia en la capa de ligante. Es un mecanismo de fallo por adherencia.
- *Desplazamiento (displacement)*: pérdida de material de la superficie del árido a través una rotura en la película de mástico o posible separación de la interfase árido-betún.
- *Dispersión del mástico*: debilitamiento de la cohesión en el ligante o el mástico debido a largos periodos de difusión y pérdida de material a causa del paso de agua.
- *Micro-roturas*: roturas en el mástico o los áridos. El efecto de las micro-roturas es un deterioro general de la integridad estructural del material y la formación de nuevos caminos para el transporte de la humedad.
- *Desorción del mástico*: desaparición de las capas exteriores del mástico debido a la presencia de flujo de agua.
- *Emulsión espontánea*: debida a pequeñas gotas de agua que penetran en el conglomerante.

En la *Figura 10* se presentan dos situaciones en las que un árido envuelto por una capa de mástico (betún + árido fino) y bajo las mismas condiciones, se somete a dos procesos diferentes: uno en el que aparece presión en los poros llenos de agua, y otra donde se produce una difusión del vapor de agua hacia el interior de la mezcla. En la imagen se puede apreciar que las dos situaciones generan mecanismos de daño por humedad diferentes. El caso a) provoca la aparición de microroturas tanto en el árido como en el ligante y la consecuente pérdida de capacidad portante del material. En el caso b), en cambio, se produce un fallo por pérdida de adherencia entre árido-betún.

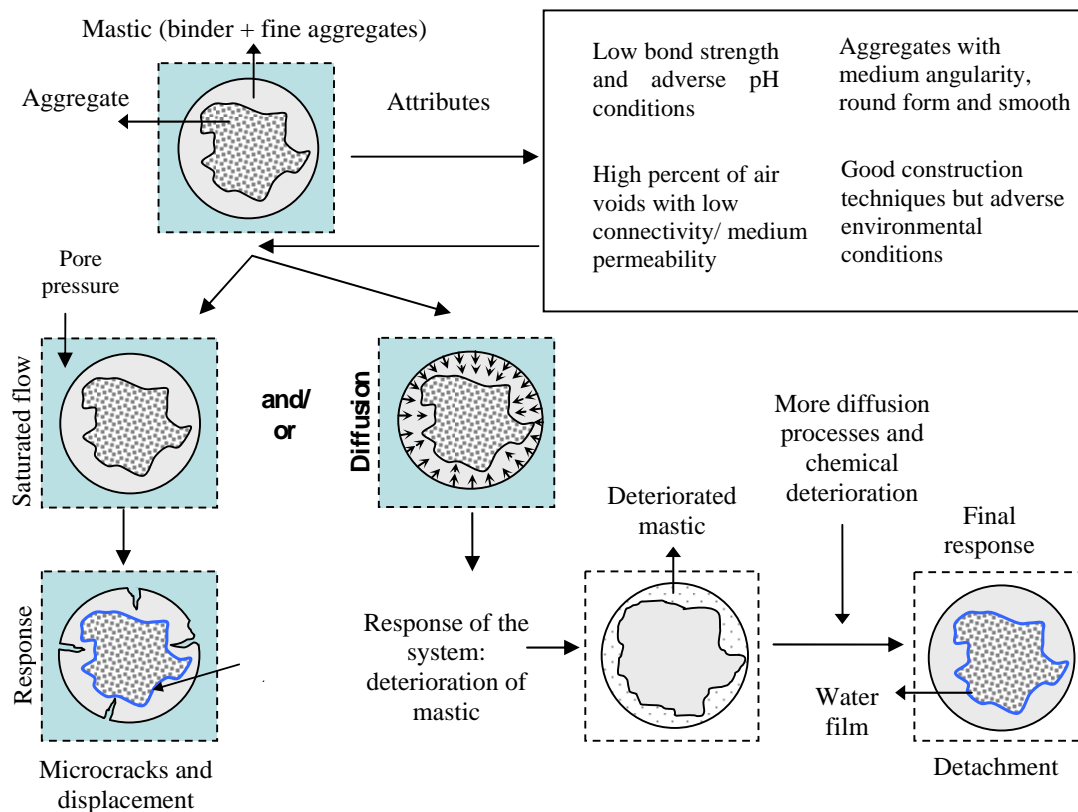


Figura 10. Dos posibles mecanismos de daño por humedad bajo las mismas condiciones: a) presión en los poros provoca micro-roturas y desplazamiento, y b) la difusión de la humedad provoca disgregación entre árido-betún (Caro Espinel, 2009).

3.8.2. Humedad en áridos siderúrgicos

En el campo de los áridos siderúrgicos se han llevado a cabo pocos experimentos en relación a la afectación por humedad. Revisando la literatura existente encontramos pocas referencias a éste ámbito, aunque encontramos algunos casos que son de nuestro interés.

(Pasetto & Baldo, 2011) llevaron a cabo un estudio para determinar diferentes propiedades de probetas fabricadas con áridos siderúrgicos. Fabricaron diversas probetas con árido siderúrgico y diferentes proporciones de betún, así como probetas con árido calizo para su posterior comparación.

Entre las propiedades que midieron se encuentra la sensibilidad al agua. Lo hicieron según la normativa italiana⁵. Ensayaron probetas que fueron sometidas a un ciclo de 7 días de inmersión en un baño termostático a 25°C, así como probetas en seco para su comparación. Posteriormente sometieron todas las probetas a tracción indirecta para comprobar su resistencia.

Demostraron en su informe que las muestras con árido siderúrgico tienen una resistencia a la tracción indirecta superior en condiciones de sequedad. Esta resistencia también es mayor después del ciclo de humedad y concluyen que el daño por humedad es menor en las probetas de árido siderúrgico que las formadas por caliza.

Por otro lado, comentan que el contenido de betún también influye en los resultados, obteniendo una mayor resistencia en aquellas probetas que contienen una mayor cantidad de betún en su dosificación.

⁵ (CRS , 2012)

MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. Toma de muestras

El material para la fabricación de las probetas utilizadas para realizar los ensayos ha sido tomado de un tramo experimental de carretera construida en Barcelona, entre Sant Andreu i Montcada i Reixac. Concretamente, corresponden a los ramales de enlace de las carreteras C-17 y N-150, que se construyeron en Febrero de 2013, conforme a las especificaciones del PG-3 para mezclas bituminosas discontinuas, por requerimiento de Infraestructures de la Generalitat de Catalunya, SAU.

Las muestras pertenecen en concreto a dos ramales, uno de aceleración y otro de deceleración, tal como muestra la *Figura 11*, las longitudes aproximadas de los cuales son de 175 y 430 metros, dependiendo del ramal.



Figura 11. Situación de los tramos de recogida de muestras

Se tomó una muestra de 110 kg de árido siderúrgico, la cual nos ha permitido la fabricación de probetas para determinar las propiedades mecánicas de este tipo de material en su uso como árido grueso en capas de rodadura.

4.1.1 Granulometría

La mezcla que se quería para pavimentar los ramales era una mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11B fabricada con árido siderúrgico, para capa de rodadura, que cumpliera los requisitos del PG-3. La empresa Adec Global S.L. fue la suministradora de los áridos siderúrgicos, mientras que Pabasfaltos S.A. aportó los áridos calizos. El diseño de la mezcla con árido siderúrgico fue realizado por el grupo MATCAR, Materiales y Carreteras de la UPC.

Adec Global es una empresa dedicada a la gestión y valorización de las escorias siderúrgicas procedentes de los hornos de fundición de chatarra y de la construcción en áridos reciclados. Poseen la única planta existente hasta el momento en Catalunya de valorización de escorias siderúrgicas, con capacidad para gestionar anualmente las 360.000 toneladas generadas en los hornos de arco eléctrico de Celsa Barcelona. (Adec Global, S.L.)

El grupo MATCAR realizó un estudio de diferentes fases para el diseño de la mezcla (Barra Bizinotto D. M., 2013). En una primera fase, se estudiaron las granulometrías de áridos a utilizar (*Figura 12* y *Figura 13*), hasta llegar a una combinación que cumpliera los requisitos del PG-3. La mezcla de áridos aprobada fue:

- Árido grueso siderúrgico, pasado por planta fracción 6/14 mm (ASA PP 6/14).
- Arena fina caliza, pasada por planta fracción 0/6 mm (AF PP 0/6).
- Filler Mineral 50, calizo.

Tamiz (mm)	Material que pasa (%)		
	ASA AP 4/11	ASA PP 6/14	AF PP 0/6
31,5	100	100	100
22.4	100	100	100
16	100	100	100
11.2	92	93	100
8	41	44	100
4	3	5	96
2	3	4	83
0,5	3	2	34
0,25	2	2	22
0,063	1	1	7

Figura 12. Granulometría de la mezcla bituminosa (Barra Bizinotto D. M., 2013)

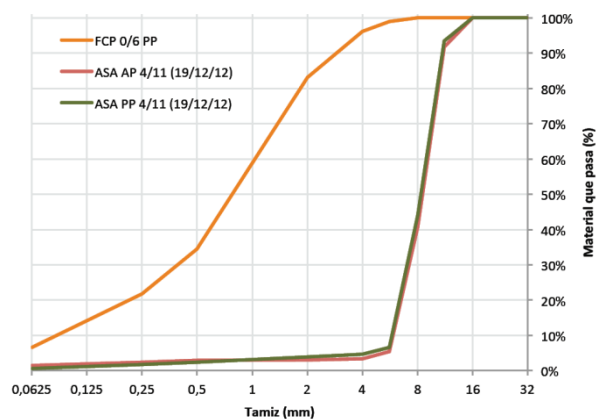


Figura 13. Curva granulométrica de las fracciones de áridos para la MB (Barra Bizinotto D. M., 2013)

La dosificación de áridos en peso, respecto el total de áridos de la mezcla finalmente usada para la mezcla es:

$$\text{ASA PP 6/14} = 83,0\% \quad \text{AF PP 0/6} = 13,0\% \quad \text{FILLER} = 4,0\%$$

Esta dosificación genera unas curvas de combinación de áridos en peso y rectificadas en volumen, que son las que se observan en la Figura 14 y Figura 15.

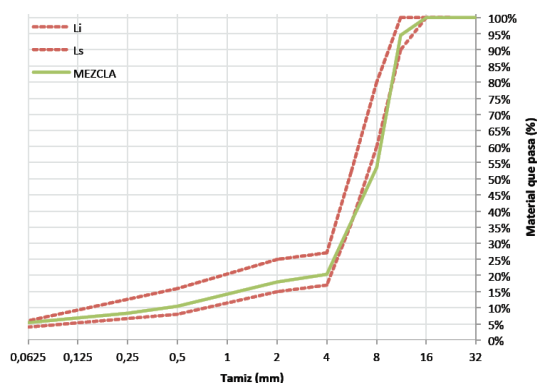


Figura 14. Curva de combinación en peso de los materiales dosificados para la mezcla bituminosa (Barra Bizinotto D. M., 2013)

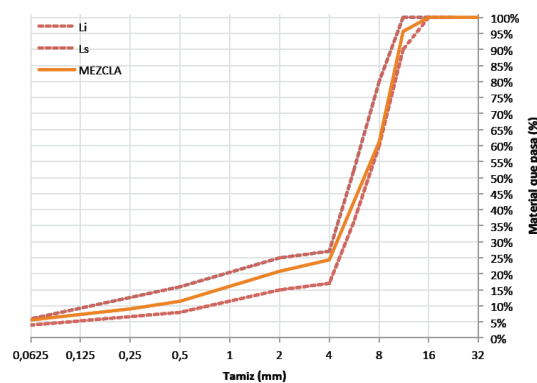


Figura 15. Curva de combinación rectificada en volumen de los materiales dosificados para la mezcla bituminosa (Barra Bizinotto D. M., 2013)

En una segunda fase, se estudió la dosificación del betún en peso (Tabla 7). Se realizaron 4 mezclas y se ensayaron la densidad y contenido de huecos, pérdida de partículas, sensibilidad al agua y deformación permanente. Se eligió la mezcla que cumplía con los requisitos establecidos en el PG-3. El resultado fue una mezcla con un 4,28% de betún tipo BM3c sobre la mezcla, proveniente de la planta de asfalto Pabasa, S.A..

La dosificación final de la mezcla según el estudio fue:

Tabla 7. Dosificación de la mezcla con árido siderúrgico utilizada para los ensayos.

Componentes	Cantidad [kg]	% en peso s/mezcla
ASA 6/14	791	13,3
AF 0/6 caliza	127	82,7
Filler calizo	39	4,1
Betún BM3C	43	4,3
Total	1000	100

4.2. Fabricación y plan de trabajo

4.2.1. Fabricación de las probetas

El procedimiento de fabricación de las probetas se ha llevado a cabo siguiendo la normativa vigente en España *UNE-EN 12697-35. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio* (AENOR, 2006).

Para los aparatos utilizados para hacer las mediciones se ha seguido la norma *UNE-EN 12697-38. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 38: Aparatos de ensayo y calibración* (AENOR, 2007).

Finalmente, para la compactación se han seguido las especificaciones marcadas en la *UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 38: Preparación de la muestra mediante compactador por impactos* (AENOR, 2013).

Se han fabricado un total de 80 probetas de mezcla bituminosa para capa de rodadura (drenante y discontinua), de la muestra tomada en el tramo experimental construido en Barcelona. De estas 80 probetas, se han descartado 8 ya que presentaban una dispersión respecto de la densidad media superior al 1,7%, como se explicará en el apartado “5. RESULTADOS Y COMENTARIOS”

Las probetas eran probetas cilíndricas de $101,6 \pm 1$ mm de diámetro y $63 \pm 2,5$ mm de altura (*Figura 16*). Se disponía de moldes específicos para conseguir estas medidas. Para la fabricación de cada probeta se han utilizado 1310 g de la muestra mezcla bituminosa con árido siderúrgico, que estaba disponible en el laboratorio de asfaltos de la ETSECCPB, previamente calentada en un horno a 160°C. Posteriormente se calentaron manualmente

mediante un cazo sobre una placa de gas hasta alcanzar 160°C y se procedió a su introducción en el molde, calentado también hasta los 160°C, con la ayuda de un embudo y se acomodó mediante una primera compactación con espátula. Posteriormente se procedió a la compactación por impacto. Se realizaron 50 golpes por cara.

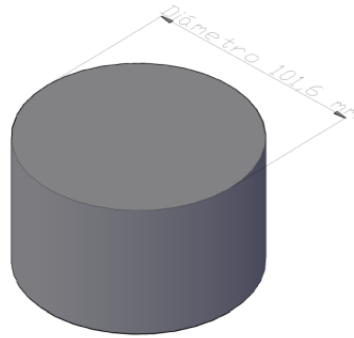


Figura 16. Probeta cilíndrica (Cortés, 2014)

Una vez fabricadas y numeradas las probetas, se dejaron enfriar a la temperatura ambiente del laboratorio (aproximadamente 20°C) para proceder a su desmoldado mediante un gato hidráulico.

4.2.2. Plan de trabajo

Las probetas fabricadas se sometieron a diferentes ciclos de humedad-sequedad a diferentes temperaturas. Se dispusieron baños a tres temperaturas diferentes: 20, 30 y 40°C. Para cada temperatura, se llevaron a cabo ciclos de humedad-sequedad, cada uno de los cuales consistió en 3,5 días de inmersión en agua y los 3,5 días siguientes de secado. Seis probetas por cada temperatura se sometieron a 4, 8 y 12 ciclos respectivamente, según muestra la *Tabla 8*, en la que se observa las probetas utilizadas para cada ensayo (M: módulo resiliente; TI: tracción indirecta; F: ensayo fénix; Esc.: escáner de alta resolución; SEM: microscopio electrónico de barrido). En total, 54 probetas han sido sometidas a ciclos de humedad-sequedad y ensayadas posteriormente.

Además, se han realizado los mismos ensayos en probetas que no han sido alteradas por los ciclos (*Tabla 9*) para su posterior comparación, analizada en el apartado “5.RESULTADOS Y COMENTARIOS”. Por lo que el número total de probetas ensayadas ha sido de 63.

Por otro lado, para el estudio a nivel microscópico se ha reservado 1 probeta por cada temperatura y número de ciclos. Por lo tanto, el número final de probetas utilizadas en esta tesina ha sido de 72.

Tabla 8. Distribución de probetas en los baños y uso para ensayos.

Temp (°C)	4 CICLOS					8 CICLOS					12 CICLOS				
	M	TI	F	Esc.	SEM	M	TI	F	Esc.	SEM	M	TI	F	Esc.	SEM
20	3	3*	3	1	0	3	3*	3	1	0	3	3*	3	1	0
30	3	3*	3	1	0	3	3*	3	1	0	3	3*	3	1	0
40	3	3*	3	1	1**	3	3*	3	1	1**	3	3*	3	1	1**

*Las probetas utilizadas para TI son las mismas utilizadas que para módulo resiliente.

** Las probetas utilizadas para SEM son las mismas que las utilizadas para escáner y fueron sometidas a baños a 40°C.

Tabla 9. Distribución de las probetas para los ensayos en la "Condición 0"

C0		
M	TI	F
6	6*	3

4.3. Ensayos realizados

4.3.1. Densidad

La densidad de las probetas se ha determinado según lo especificado en las normas *UNE-EN 12697-5. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de las dimensiones máximas de las probetas bituminosas* (AENOR, 2006) y *UNE-EN 12697-5. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima* (AENOR, 2010).

4.3.1.1. Densidad aparente de la probeta

La densidad aparente en seco es aquella que mide la masa en seco por unidad de volumen, incluidos los huecos de aire, de una probeta bituminosa. Para calcularla, se han tomado la medida, mediante un pie de rey digital de precisión 0,1mm, de 3 alturas (h_1 , h_2 y h_3) y dos diámetros (d_1 y d_2) de cada probeta para calcular la altura y diámetro medios (h_{media} y d_{medio}) posteriormente. También se ha obtenido la masa (m) de cada probeta mediante una balanza de precisión 0,1g.

Con estos datos, se ha calculado la densidad aparente en seco mediante la siguiente fórmula matemática:

$$D_{aparente} = \frac{m}{\frac{\pi \cdot d_{medio}^2}{4} \cdot h_{media}} \cdot 1000 \quad (1)$$

dónde:

- $D_{aparente}$: Densidad aparente de la probeta (en kg/m^3)
 m : Masa de la probeta (en g)
 d_{medio} : Diámetro de la probeta (en cm)
 h_{media} : Altura de la probeta (en cm)

A partir de los valores de densidad de las probetas se analizó su dispersión para comprobar la fiabilidad de las probetas fabricadas. De este modo, se descartaron 8 probetas que presentaban una dispersión superior al 1,7%.

4.3.1.2. Densidad máxima de la mezcla

La densidad máxima se define como la masa por unidad de volumen, sin huecos de aire, de una probeta bituminosa. Se calcula matemáticamente como:

$$D_{máx.mat.} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{ áridos}}{\rho_{\text{áridos media}}} \right) + \left(\frac{\% \text{ betún}}{\rho_{\text{betún}}} \right)} \quad (2)$$

dónde:

- $D_{máx.mat.}$: Densidad máxima por método matemático de la probeta (en kg/m^3)
 $\% \text{ áridos}$: Porcentaje de áridos en mezcla, calculado como $\% \text{ árido} = 100 - \% \text{ betún}$
 $\rho_{\text{áridos media}}$: Densidad aparente media de los áridos (en kg/m^3), calculado como media ponderada de las densidades aparentes de cada árido (conocidos) y su porcentaje en la mezcla (en 1 m^3 de mezcla). Éste se calcula a partir de la *Densidad aparente en seco media* de la mezcla.
 $\% \text{ betún}$: Porcentaje de ligante existente en mezcla
 $\rho_{\text{betún}}$: Densidad del ligante existente en mezcla a 25°C (en kg/m^3). Conocido sobre la mezcla.

4.3.2. Volumen de huecos

Para la determinación del volumen de huecos en la mezcla bituminosa, seguimos el procedimiento marcado en la norma *UNE-EN 12697-8. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del volumen de huecos de las probetas bituminosas* (AENOR, 2003).

El contenido de huecos de una mezcla bituminosa se calcula utilizando la densidad máxima de la mezcla y la densidad aparente de la probeta. Se expresa en porcentaje de huecos en mezcla a partir de expresión:

$$V_m(\%) = \frac{D_{\text{máx.mat.}} - D_{\text{aparente}}}{D_{\text{máx.mat.}}} \cdot 100 \quad (3)$$

dónde:

- V_m : Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%)
- $D_{\text{máx.mat.}}$: Densidad máxima (en kg/m^3)
- D_{aparente} : Densidad aparente en seco (en kg/m^3)

4.3.3. Módulo resiliente

La norma que indica el procedimiento para determinar el módulo resiliente o módulo de rigidez es la *UNE-EN 12697-26. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez* (AENOR, 2012).

Para este ensayo se han utilizado 3 probetas por temperatura y número de ciclos, como se explica en el apartado “4.2.2. Plan de trabajo”.

La resiliencia se define como el trabajo externo que hay que realizar para que un material se deforme hasta su límite elástico. Con el módulo resiliente, se evalúa el comportamiento de una mezcla asfáltica bajo cargas de compresión dentro de la zona de deformaciones elásticas (lejos de la rotura), donde la deformación se recupera instantáneamente después del cese de la carga. Contra más elevado sea este módulo, mayor será el valor de la carga que soporta la mezcla para una determinada deformación recuperable. Por lo tanto, para igualdad de valor de carga aplicada, aquella mezcla con un mayor módulo de resiliencia, tendrá unas deformaciones recuperables menores.

Para llevar a cabo este ensayo es necesario que la temperatura de la cámara dónde se realice sea de 20°C y las probetas deben ser acondicionadas anteriormente a esta temperatura.

El ensayo se lleva a cabo en un equipo con un sistema de carga que incorpore un actuador de carga que permita aplicar una carga al diámetro vertical de la probeta a través de las platinas de carga (*Figura 17*). La probeta cilíndrica a ensayar se ajusta en el marco de montaje mediante unas mordazas. Posteriormente, se aplican 10 pulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración, para obtener la deformación en el diámetro horizontal y el tiempo de carga especificados.

Como se observa, en este ensayo se ejerce una carga en el diámetro vertical, pero se mide la deformación en el horizontal, por lo tanto, puede considerarse como un ensayo de tracción indirecta.

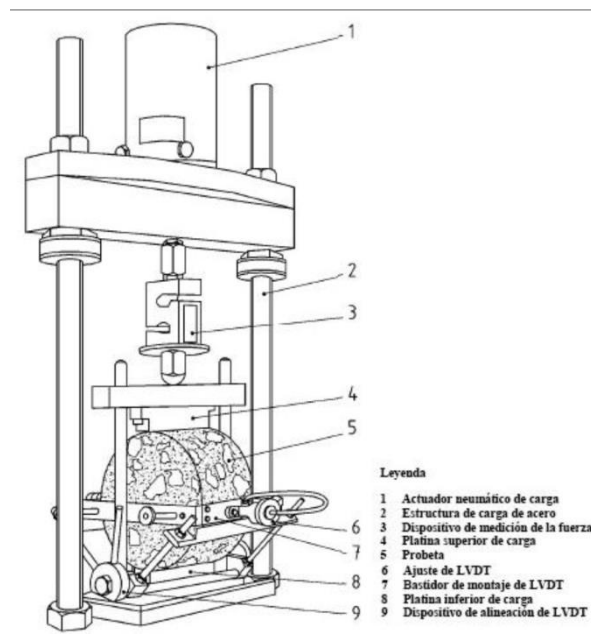


Figura 17. Montaje del ensayo de módulo de rigidez

Una vez hechos los pulsos de acondicionamiento, se procede a realizar el ensayo. Éste consta de 5 pulsos en los que el equipo ejerce la fuerza máxima (F) para que la deformación sea la máxima permitida, 5 μ m, en el tiempo (t) llamado tiempo de subida.

Para cada uno de los 5 impulsos de carga se debe determinar el módulo de rigidez medido y ajustarlo. Una vez tenemos los módulos ajustados, se calcula el módulo medio.

El programa calcula el módulo de rigidez medido como:

$$M_{resiliente}^{medido} = \gamma \cdot \frac{F}{z} \quad (4)$$

dónde:

$M_{resiliente}^{medido}$: Módulo resiliente medido (en MPa)

F: Valor máximo de carga vertical aplicada (en N)

z: Amplitud de la deformación horizontal durante la carga (0,005 mm)

γ : Factor de forma de la probeta, calculado:

$$\gamma = \frac{v + 0,27}{h} \quad (5) \quad \text{dónde:} \quad \begin{array}{ll} v: & \text{Coeficiente de Poisson (0,35)} \\ h: & \text{Espesor medio de la probeta o altura (en mm)} \end{array}$$

Este módulo de rigidez medido se debe ajustar a un factor de superficie de carga de 0,60, obteniendo el módulo resiliente ajustado:

$$M_{resiliente}^{ajustado} = M_{resiliente}^{medido} \cdot \left(1 - 0,322 \cdot \left(\log(M_{resiliente}^{medido}) - 1,82\right) \cdot (0,60 - k)\right) \quad (6)$$

dónde:

$M_{resiliente}^{ajustado}$: Módulo resiliente ajustado (en MPa)

$M_{resiliente}^{medido}$: Módulo resiliente medido (en MPa)

k: Factor de superficie de carga medido

Finalizada esta primera parte del ensayo, debe extraerse la probeta del equipo y proceder a su colocación de nuevo girándola 90° respecto al diámetro vertical ensayado anteriormente. Se lleva a cabo el mismo procedimiento descrito anteriormente y se obtiene el módulo medio de este último ensayo.

Finalmente, el módulo de rigidez resulta como el valor medio de los dos ensayos realizados, siempre que el segundo módulo esté comprendido entre el +10% o el -20% del

valor medio registrado para el primer ensayo. En caso contrario, los resultados deben ser rechazados.

Puesto que el ensayo de módulo resiliente es un ensayo no destructivo, las probetas utilizadas para este ensayo fueron usadas posteriormente para el ensayo de tracción indirecta.

4.3.4. Tracción indirecta

Para el ensayo de tracción indirecta, se han seguido las especificaciones descritas en la norma *UNE-EN 12697-23. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas* (AENOR, 2004). Esta norma define la resistencia a la tracción indirecta como la resistencia máxima a la tracción de una probeta cilíndrica sometida a carga diametral hasta su rotura, a la temperatura de ensayo especificada y a la velocidad de desplazamiento especificada de la prensa de ensayo *Figura 18*.

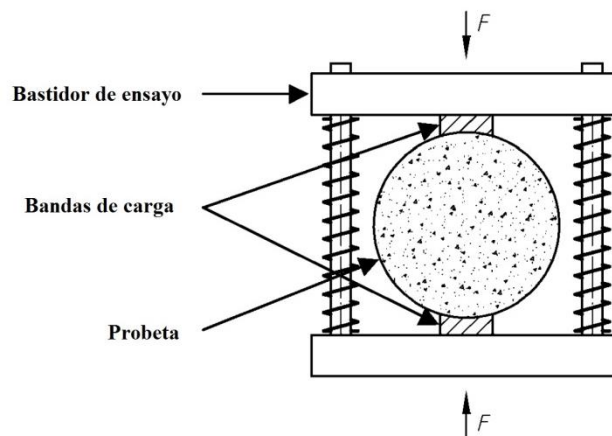


Figura 18. Esquema de montaje de la prensa de ensayo.

En este caso el ensayo se realizó a una temperatura constante de 15°C, y la velocidad constante de bajada del pistón ha sido de 50 mm/min. Se registraron los valores de fuerza (kgf) de compresión (tracción indirecta) que se han generado sobre la probeta cada 0,02 segundos, hasta su rotura.

Posteriormente, se calculó el valor de la resistencia a tracción indirecta (ITS) teniendo en cuenta esfuerzo de tracción máximo calculado en función de la carga máxima aplicada cuando se produce la rotura y de las dimensiones de la probeta.

Para ello, y para cada probeta, se utiliza la fórmula:

$$ITS: \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d_{medio} \cdot h_{media}} \quad (7)$$

dónde:

- ITS: Resistencia a la tracción indirecta (en MPa)
P: Valor de la carga máxima (en kN)
 d_{medio} : Diámetro medio de la probeta (en mm)
 h_{media} : Altura media de la probeta (en mm)

4.3.4.1. Tracción indirecta en las probetas de “condición 0”

Se debe mencionar que para la realización del ensayo de tracción indirecta en las probetas que no han sido sometidas a baños se han seguido las pautas marcadas en la norma *UNE-EN 12697-12. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa* (AENOR, 2006).

Las probetas de “condición 0” sometidas al ensayo de tracción indirecta fueron 6. Tres de ellas se sometieron también al ensayo de sensibilidad al agua. Según las especificaciones de este ensayo, las probetas deber ser sumergidas en agua a 40°C durante 72 horas previamente al ensayo de tracción, seguidas por 24 horas de secado y acondicionamiento a 15°C, que es la temperatura a la que se llevó a cabo el ensayo de tracción indirecta.

4.3.5. Fénix

El ensayo fénix es un ensayo desarrollado en el laboratorio de mezclas bituminosas de la Escuela de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya. En la actualidad, no existe normativa al respecto. No obstante se dispone de las pautas necesarias para llevar a cabo el ensayo, tales como: acondicionamiento de equipos y probetas, ejecución del ensayo y cálculo e interpretación de resultados. Estas pautas están disponibles en el artículo “*Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures*” (Pérez-Jiménez, Botella, Martínez, & Miró, 2013).

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a fisuración por tracción de las mezclas bituminosas. Para ello, se calcula la energía disipada en el proceso de fisuración

por tracción de media probeta cilíndrica pegada a unas placas de acero. El ensayo se puede realizar a diferentes temperaturas: -15 , -5 , 5 y 20°C .

Las probetas utilizadas para este ensayo fueron cortadas diametralmente por el centro en dos mitades (mitad A, mitad B) (*Figura 19*). A cada mitad se le realizó un surco de 6mm en el centro y fueron sometidas a los diferentes ciclos de humedad-sequedad a las diversas temperaturas explicados en el apartado “4.2.2. Plan de trabajo”. Cada mitad de una misma probeta, A y B, fue ensayada a 20°C y 5°C respectivamente.

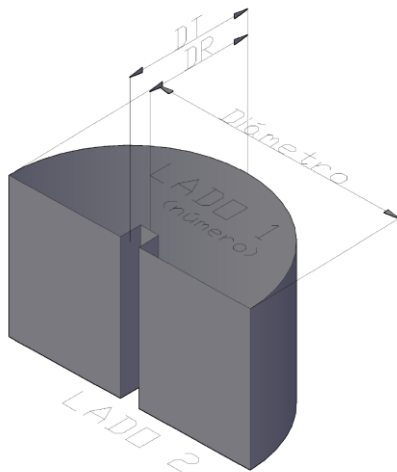


Figura 19. Probeta cortada para ensayo fénix
(Cortés, 2014).

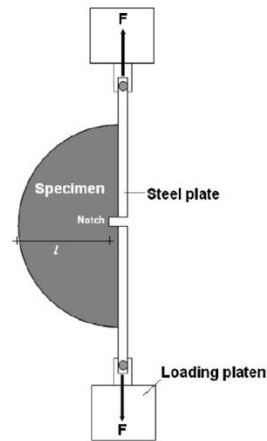


Figura 20. Preparación de la probeta para el ensayo fénix
(Pérez-Jiménez, Botella, Martínez, & Miró, 2013)

Para realizar el ensayo, cada mitad de probeta se pegó mediante resina epoxi a unas placas de acero exentas de impurezas. Cada placa de acero se fijó a las placas de carga del equipo de ensayo, de manera que podían rotar sobre un punto fijo (*Figura 20*).

Una vez acondicionado el equipo a la temperatura de ensayo y con el montaje de la probeta realizado, se procedió a la ejecución del ensayo. Éste consiste en someter a tracción directa la media probeta a una velocidad de 1mm/min , registrándose los valores de fuerza generada por cada desplazamiento. El ensayo concluye cuando el desplazamiento alcanza los 10 mm , o una vez que el valor de la carga es residual (4 kgf o inferior).

A este ensayo se han sometido 3 probetas enteras por cada temperatura y número de ciclos, cada mitad de las cuales se ha ensayado a 5 o 20°C .

A partir de los datos obtenidos en el ensayo fénix y tras un correcto procesamiento de los mismos, se obtienen numerosos parámetros que nos sirven para el estudio de las propiedades mecánicas de la mezcla. Estos parámetros se definen a continuación:

- *Carga máxima de tracción ($F_{máx}$):* carga máxima durante el ensayo.
- *Desplazamiento a carga máxima de tracción ($\Delta F_{máx}$):* desplazamiento registrado en el momento en el que se alcanza la carga máxima de tracción ($F_{máx}$).
- *Resistencia a tracción (R_T):* es la relación entre la carga máxima de tracción ($F_{máx}$) y el área de fractura (A_f).

$$R_T = \frac{1000 \cdot F_{máx}}{A_f} \quad (8) \quad \text{siendo} \quad A_f = h_{media} \cdot d_{ranura}^{media} \quad (9)$$

dónde:

R_T :	Resistencia a tracción (en MPa)
$F_{máx}$:	Valor de la carga máxima (en kN)
A_f :	Área de fractura (en mm ²)
$d_{ranura\ media}$:	Distancia de ranura media (en mm), medido como la media entre las distancias desde el interior de la hendidura hasta el borde
h_{media} :	Altura (espesor) media de la probeta (en mm)

- *Índice de rigidez a tracción (I_{RT}):* es la relación entre la carga antes de la carga máxima, entre el 25% y el 50% de ésta ($F_{máx50\%} - F_{máx25\%}$), y el desplazamiento del pistón en ese punto ($\Delta F_{máx50\%} - F_{máx25\%}$). Se utiliza el tramo de fuerza que desde un cuarto de la fuerza máxima hasta la mitad de ésta para evitar tramos no lineales que generen dispersión en los datos. Se calcula como:

$$I_{RT} = \frac{F_{máx50\%} - F_{máx25\%}}{\Delta F_{máx50\%} - F_{máx25\%}} \quad (10)$$

dónde:

I_{RT} :	Índice de rigidez a tracción (en kN/mm)
$F_{máx50\%}$:	Valor de la mitad de la carga máxima (en kN)
$F_{máx25\%}$:	Valor de un cuarto de la carga máxima (en kN)

$\Delta F_{\text{máx}50\% - F_{\text{máx}25\%}$: Desplazamiento entre el 25% y el 50% de la carga máxima (prepico, en mm)

- *Energía de fractura (G_D)*: es el trabajo total realizado en la fisuración (W_D), que es perpendicular a la fuerza aplicada. Se calcula como:

$$G_D = \frac{W_D}{A_f} \quad (11)$$

dónde:

G_D : Energía disipada (en J/m²)
 W_D : Trabajo total de fractura (en kN·mm)
 A_f : Área de fractura (en m²)

A su vez, el trabajo realizado en el proceso de disipación (W_D) se calcula de forma discreta como:

$$W_D = \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) \cdot y_i + 0,5 \cdot (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad (12)$$

dónde:

W_F : Trabajo total de fractura (en kN·mm)
 x : Desplazamiento registrado (mm)
 y : Carga registrada (kN)
 n : Punto en que la carga ha descendido a 0,1 kN

- *Índice de tenacidad (I_T)*: es aquel que señala la energía que absorbe la probeta durante la deformación plástica y permite soportar los esfuerzos superiores de fluencia sin producir fracturas.

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{\text{máx}}}}{A_f} \cdot (\Delta F_{\text{máx}50\%} - \Delta F_{\text{máx}}) \cdot 10^6 \quad (13)$$

dónde:

I_T : Índice de tenacidad (en J/mm)
 W_D : Trabajo total de fractura (en kN·mm)
 $W_{F_{\text{máx}}}$: Trabajo de fractura realizado hasta la carga máxima (en kN·mm)
 A_f : Área de fractura (en mm²)
 $\Delta F_{\text{máx}50\%}$: Desplazamiento al 50% de la carga máxima (postpico, en mm)
 $\Delta F_{\text{máx}}$: Desplazamiento a carga máxima (en mm)

- *Desplazamiento de rotura (Δ_R):* es el desplazamiento que se registra para un valor de fuerza de descarga de 0,1 kN. Es indicativo de la tenacidad de la mezcla puesto que para mezclas dúctiles obtendremos valores de Δ_R elevados, mientras que para mezclas frágiles, esos valores serán pequeños.

Este parámetro nos sirve para diferenciar mezclas con igual energía de fractura, pero con un comportamiento en cuanto a la tenacidad diferente.

En la *Figura 21* se muestran los valores más representativos de la curva fuerza-desplazamiento obtenida durante el ensayo fénix.

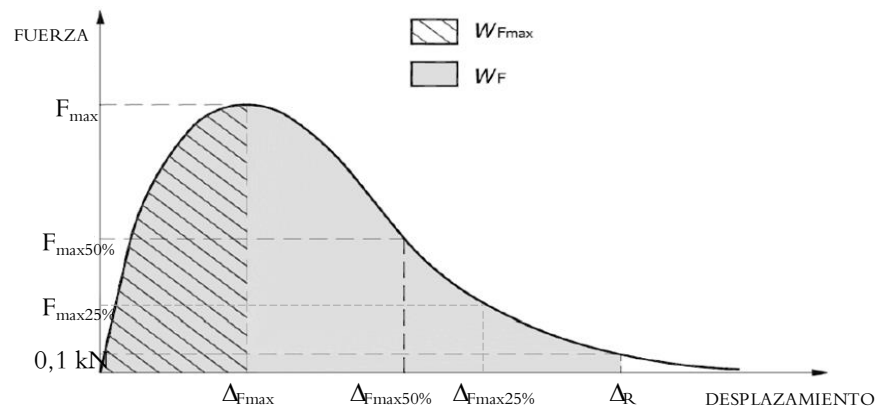


Figura 21. Valores representativos de la curva fuerza-desplazamiento del ensayo fénix (Cortés, 2014).

4.4. Análisis de la interfase árido-betún

Además de los resultados proporcionados por los diferentes ensayos, se ha realizado también un análisis del daño causado en la interfase árido betún. Una probeta cilíndrica por cada ciclo y temperatura que no ha sido sometida a ningún ensayo se ha reservado con el fin de observar, mediante diferentes técnicas, la interfase árido-betún y los daños causados en ésta, pudiendo deducir de esta manera si los daños causados por la humedad han sido fallos por cohesión en el mástico o fallos por adherencia entre las partículas de árido y el ligante.

4.4.1. Análisis visual de la interfase

Después de cada ensayo de tracción indirecta y de fénix, aquellos en los que se produce rotura de las muestras, se ha llevado a cabo un análisis visual de la superficie de fractura a simple vista (*Figura 22. Imagen de la superficie de fractura de media probeta ensayada a fénix y Figura 23. Imagen de la superficie de fractura de una probeta ensayada a tracción indirecta*). De este modo, se puede saber de manera cualitativa cuál ha sido la causa del fallo, que depende principalmente de la temperatura a la que se realiza cada ensayo. Las principales formas de fallo son:

- Rotura de los áridos.
- Fallo de adherencia entre al árido y el ligante en la interfase.
- Pérdida de la cohesión en el mástico.

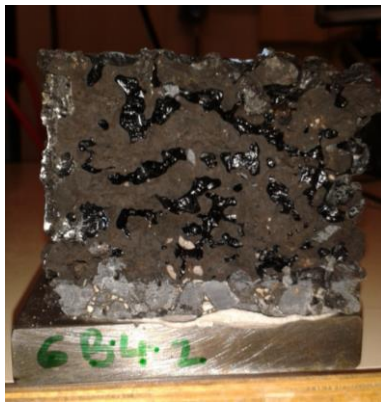


Figura 22. Imagen de la superficie de fractura de media probeta ensayada a fénix

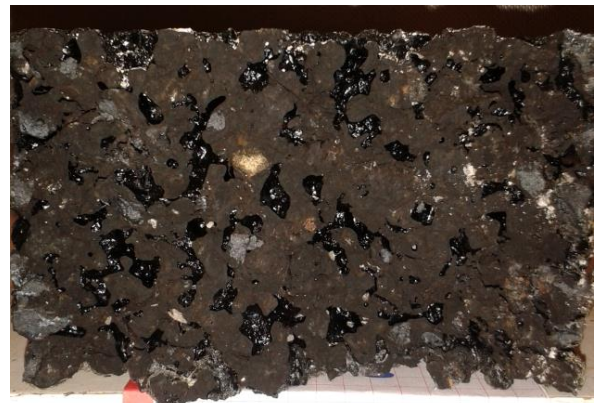


Figura 23. Imagen de la superficie de fractura de una probeta ensayada a tracción indirecta.

4.4.2. Escáner de alta resolución de las probetas

Con la finalidad de obtener una información de la interfase más detallada que una observación a simple vista, se han obtenido imágenes de las muestras mediante un escáner de alta resolución (9.600 ppp⁶).

Se han obtenido imágenes mediante escáner de dos muestras de una probeta por cada número de ciclos y temperatura (*Tabla 10*).

⁶ Ppp: puntos por pulgada (del inglés dpi: dots per inch).

Tabla 10. Probetas dedicadas al escáner de alta resolución.

Temp (°C)	4 CICLOS	8 CICLOS	12 CICLOS
	Escáner	Escáner	Escáner
20	1	1	1
30	1	1	1
40	1	1	1

4.4.2.1. Preparación de las muestras

Partiendo de las probetas cilíndricas de $101,6 \pm 1$ mm de diámetro y $63 \pm 2,5$ mm de altura, se han obtenido de cada probeta, mediante una cortadora radial, dos muestras prismáticas de dimensiones aproximadas $30 \times 20 \times 10$ mm³. Estas muestras se han sometido a una pistola de aire comprimido para eliminar cualquier tipo de resto que pudieran contener.

Una vez tenemos las probetas limpias, necesitamos un recipiente de plástico de dimensiones ligeramente superiores a las de dos veces la muestra para proceder a su embutido en resina. El objetivo de poner la resina es rellenar todos los huecos y la expulsión del aire del interior de las muestras, para así conseguir un análisis con fiabilidad en la parte del estudio con escáner y microscopía electrónica.

Para el embutido en resina, es necesario someter la muestra limpia a un vacío de al menos 200 mbar durante media hora. Posteriormente, se procede a la introducción de la resina epoxi líquida mezclada convenientemente con un catalizador al interior del recipiente mediante un tubo que posee la máquina de vacío, y se deja en vacío durante media hora más con el objetivo de eliminar todas las pequeñas burbujas de aire que puedan haber.

Posteriormente, se sacan las muestras de vacío con la resina ya puesta, y se coloca el recipiente en un horno a 40°C para favorecer el endurecimiento de la resina.

Una vez la resina ha endurecido, se procede a la preparación de las muestras para ser observadas. Para ello, hay que eliminar la pequeña capa de resina que recubre los áridos. Para ello se lleva a cabo un proceso de pulido en húmedo con diferentes tamaños de grano de lija. Se empieza con una lija de grano grueso, tamaño 80, pasando por lijas cada vez de menos tamaño: 120, 400 y 600 hasta llegar a la lija de grano de menor tamaño,

la de 1000. Una vez finalizado el proceso de pulido, debe comprobarse con una lupa de aumento que la superficie de las muestras sea lisa y no presente marcas de pulido.

4.4.2.2. Escaneado de las muestras prismáticas

Una vez tenemos las muestras preparadas, se han sometido a un proceso de escáner de alta resolución con el objetivo de ver con mayor detalle la interfase árido-betún. El resultado obtenido es el que muestra la *Figura 24*. Una vez obtenida la imagen del escáner, ésta se somete a un proceso de post-procesado para mostrar con mayor detalle los huecos de la mezcla (*Figura 25*). No obstante, no se muestran los huecos propios del árido siderúrgico, puesto que estos no son relevantes para los resultados obtenidos en el conjunto de ensayos realizados.

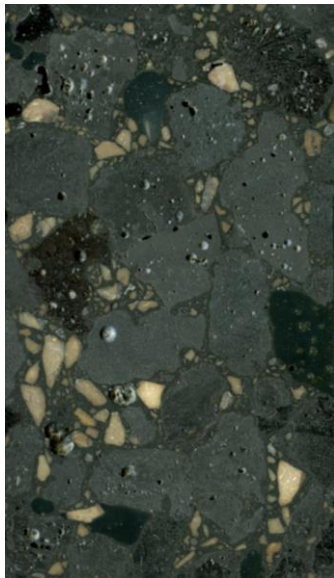


Figura 24. Escaneado de muestra.

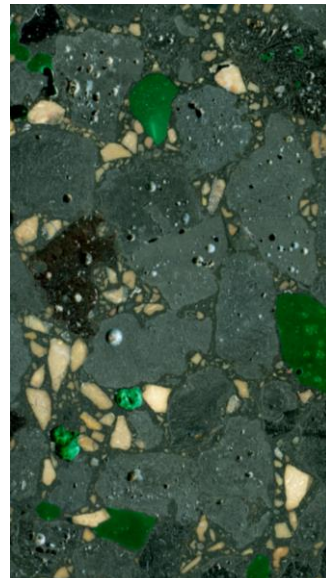


Figura 25. Imagen post-procesada después del escaneado mostrando los huecos.

4.4.3. Microscopia electrónica de barrido

Un microscopio electrónico de barrido (SEM: Scanning Electron Microscope) es aquel que utiliza un haz de electrones para formar la imagen en lugar de utilizar un haz de luz. Se producen imágenes de gran aumento, de manera que se pueden examinar las muestras con gran exactitud.

En nuestro caso, el objetivo es observar la interfase árido-betún y los posibles daños causados por la humedad y la temperatura debido a los ciclos de humedad-sequedad.

Para la observación de nuestras muestras con microscopio SEM nos hemos dirigido a la *Unidad de Servicios Científico-técnicos de la Universidad de Barcelona*.

Para la microscopía electrónica de barrido, se han utilizado únicamente las probetas que han sido sometidas a ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 40°C, puesto que estas son las que, a priori, habrán de presentar un mayor daño (*Tabla 11*).

Tabla 11. Probetas dedicadas al estudio mediante microscopía electrónica.

Temp (°C)	4 CICLOS	8 CICLOS	12 CICLOS
	SEM	SEM	SEM
20	0	0	0
30	0	0	0
40	1	1	1

4.4.3.1. Principios básicos de funcionamiento de un SEM

Los microscopios de barrido electrónicos (*Figura 26*) constan de una cámara de vacío en la que se sitúa la muestra en la parte inferior (*Figura 27*) conectada a la base mediante un conductor (en nuestro caso de cobre) para favorecer el paso de los electrones. En la parte superior, hay una salida de la que fluye una columna de electrones acelerados que impactan sobre la muestra. Existen en el interior de la cámara unos detectores que monitorizan una gran variedad de señales que resultan de la interacción de los electrones con la muestra. Un equipo de visión muy avanzado (*Figura 28*) construye una imagen a partir de la señal percibida por los detectores (Darvish Poulikakos, 2011).



Figura 26. Microscopio SEM.



Figura 27. Vista de la cámara de un SEM.

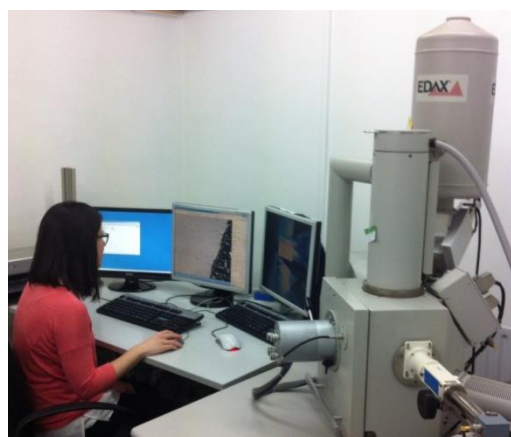


Figura 28. Microscopio SEM con equipo de visión.

4.4.3.2. Preparación de las muestras

Para la microscopía electrónica partimos de las probetas embutidas como previamente se ha explicado. En este caso, el tamaño de la muestra prismática debe ser menor que el utilizado para el escáner de alta resolución, por lo que las muestras analizadas mediante SEM tienen un tamaño aproximado de $15 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$.

Posteriormente, hay que someterlas a un proceso de pulido distinto del realizado para la observación con el escáner de alta precisión. En este caso hay que realizar un pulido en dos fases.

En una primera fase se pulen las muestras del mismo modo que se hizo para observar mediante escáner, un pulido en húmedo disminuyendo gradualmente el tamaño de grano de lija. En una segunda fase, se equipa la pulidora mediante un paño de lija adecuado a la suspensión de polvo de sílice de 15 micras, y posteriormente a la de 6 micras, y finalmente con polvo de 1 micra. Para el pulido, se debe ejercer una ligera presión equitativa para toda la superficie, y mantenerla entre 5 y 10 minutos con cada solución.

Una vez acabada la fase de pulido, se tiene que comprobar en un microscopio convencional que se vea una superficie muy lisa, casi brillante y sin marcas de pulido. Posteriormente se debe limpiar la superficie con agua y se seca mediante el frotado suave con alcohol.

Para el estudio con el microscopio de barrido electrónico, debe cubrirse la superficie a analizar con una fina capa de carbono para hacerla una superficie conductora.

4.4.3.3. Estudio con microscopio electrónico de barrido

Una vez introducida la muestra en el interior del microscopio, éste nos genera unas imágenes (*Figura 29 y Figura 30. Ejemplos de imágenes generadas por un microscopio electrónico de barrido (SEM).*) de la superficie que podemos ampliar hasta 35.000x (x es aumentos).

Utilizando estas imágenes realizamos un estudio de la interfase árido betún, el resultado del cual se explicará en el apartado “5.RESULTADOS Y COMENTARIOS”

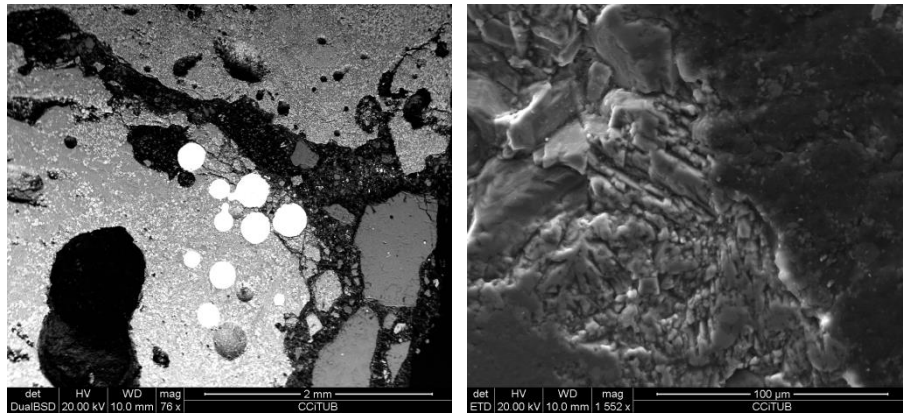


Figura 29 y Figura 30. Ejemplos de imágenes generadas por un microscopio electrónico de barrido (SEM).

Capítulo 5

RESULTADOS Y COMENTARIOS

5.1. Introducción

En este apartado se recogen los resultados obtenidos en los ensayos realizados en las probetas sometidas a diferentes ciclos de humedad-sequedad con condiciones de temperaturas diversas, así como comentarios de los resultados en relación a los mismos realizados en probetas no alteradas.

5.2. Densidad y contenido de huecos

En primer lugar se debe mencionar que la densidad de las probetas ha influido en toda las propiedades medidas con los diferentes ensayos. En la *Figura 31* se muestran las densidades medias de todo el conjunto de probetas fabricadas, así como la desviación de la muestra. Se observa que la densidad es bastante elevada. Esto es debido a que la mezcla está formada por áridos siderúrgicos, y éstos tienen una densidad superior a los áridos convencionales. Las mezclas fabricadas con áridos calizos tienen una densidad en torno a 2.200–2.400 kg/m³, mientras que las probetas fabricadas con árido siderúrgico presentaban unas densidades en torno a 2500–2600 kg/m³.

El coeficiente de variación en todo el conjunto de probetas fabricadas (las 80 probetas) era del 2,4%, por lo que se decidió descartar algunas de ellas para que la desviación de las densidades fuera menor. Así, se decidió descartar 17 de las probetas con las densidades más alejadas de la media para someter a ensayos, de manera que la dispersión final de las densidades de las probetas ensayadas ha sido del 1,7%, como se muestra en la *Figura 31*.

Por lo tanto, se han ensayado 63 probetas, incluyendo tanto las que han sido sometidas a ciclos de humedad-sequedad como las que no han sido alteradas, las denominadas probetas de la “condición 0”.

A parte de las 63 probetas ensayadas, se han utilizado 9 probetas más para el análisis visual de la interfase árido-betún. Estas 9 probetas se han seleccionado de las 17 probetas descartadas para ensayos, puesto que, en este caso, la densidad no era un factor tan importante.

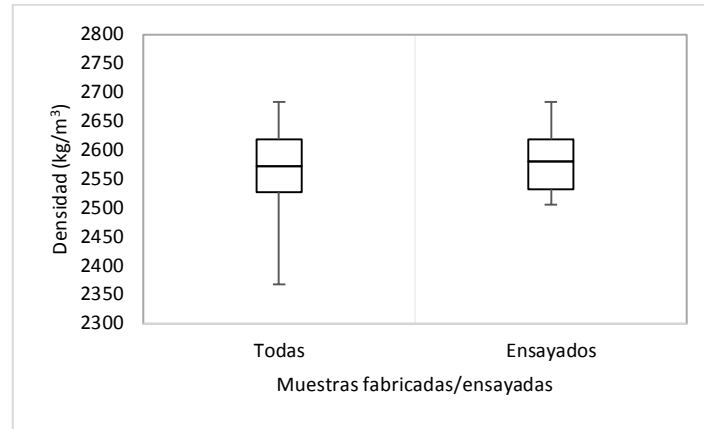


Figura 31. Densidades de las probetas fabricadas.

Por otro lado, pero relacionado con lo anterior, el contenido de huecos es también un factor influyente en la obtención de los resultados. El tanto por ciento de huecos de las muestras ensayadas varía considerablemente, desde valores entorno al 13,8% hasta probetas que alcanzan unos valores entorno al 18% de huecos (Figura 32).

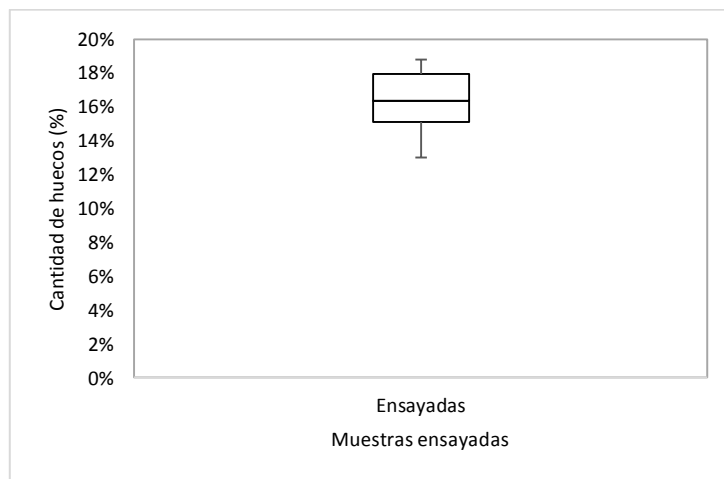


Figura 32. Tanto por ciento de huecos de las probetas ensayadas.

Cuanto mayor sea el contenido de huecos de las probetas, menor será la densidad, y, como se verá más adelante, menor será el nivel de las propiedades mecánicas que puede resistir la mezcla. Es por esto, que a la hora de analizar los resultados obtenidos, no hay

que perder nunca de vista estos dos factores tan decisivos en este caso como son la densidad y el contenido de huecos.

5.3. Ensayos de módulo resiliente

Por lo que al módulo resiliente respecta, los resultados obtenidos presentan una alta dispersión, aunque se observa una tendencia en función del número de ciclos.

En primer lugar, en la *Figura 33*, se observa que los valores de densidades para todo el conjunto de probetas ensayadas están, grosso modo, comprendidas dentro de un mismo rango. En la *Figura 34*, sin embargo, se puede observar una ligera tendencia a la baja en el valor del módulo resiliente en función del número de ciclos, indistintamente de la temperatura.

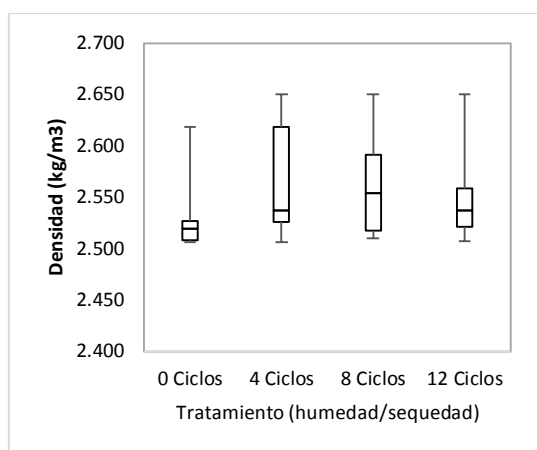


Figura 33. Densidades en función del número de ciclos

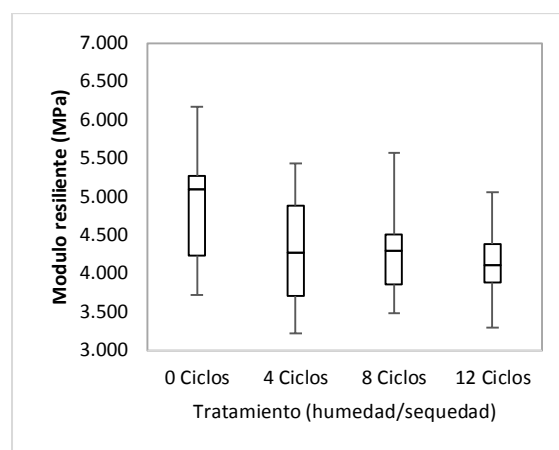


Figura 34. Módulo resiliente en función del número de ciclos

Más detalladamente, en la *Figura 35*, *Figura 36* y *Figura 37* se observan los valores del módulo resiliente para cada número de ciclos y para cada temperatura, comparados todos ellos con los valores obtenidos para la condición inicial de no alteración de la mezcla. Se observa que los valores obtenidos en la “condición 0” son siempre superiores a los de las probetas sometidas a ciclos de humedad–sequedad, aunque la variación no es significativa en la mayoría de casos.

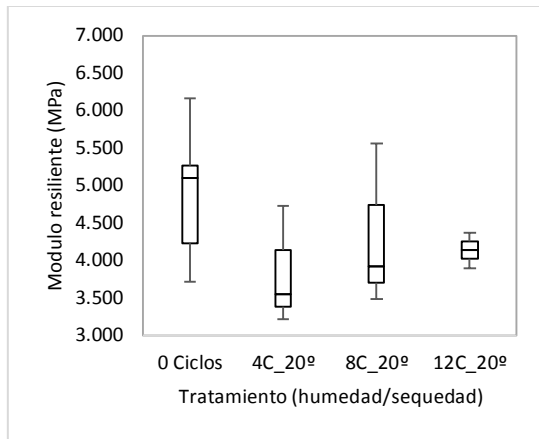


Figura 35. Módulo resiliente en función del número de ciclos a una temperatura de 20°C

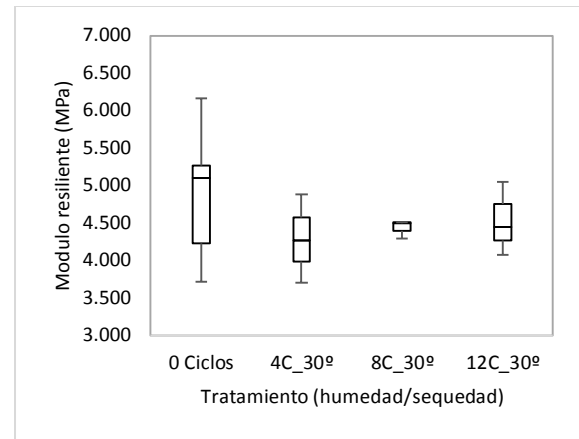


Figura 36. Módulo resiliente en función del número de ciclos a una temperatura de 30°C.

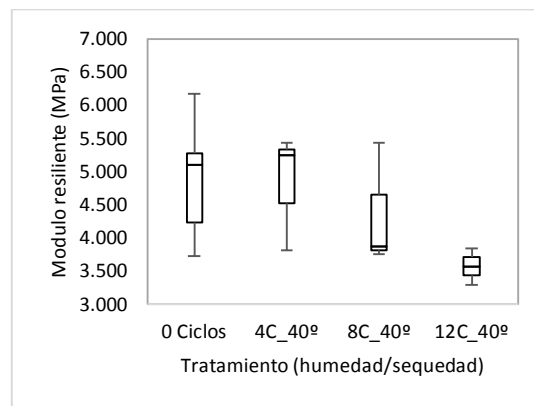


Figura 37. Módulo resiliente en función del número de ciclos a una temperatura de 40°C.

Observando las imágenes (*Figura 35*, *Figura 36* y *Figura 37*) podemos comprobar que existe un patrón de variación del módulo de rigidez. En primer lugar, para condiciones poco agresivas (bajo número de ciclos y/o baja temperatura) se observa la invariación del módulo de rigidez o una ligera disminución del mismo. Seguidamente, al seguir las probetas en condiciones adversas, se produce un pequeño repunte del valor en el módulo de rigidez, pero cuando las condiciones adversas continúan, se produce una caída drástica en el valor del mismo.

Este comportamiento se puede explicar teniendo en cuenta dos efectos contrarios que, en estas condiciones de ciclos y temperatura, se producen al mismo tiempo.

Por un lado, tenemos el efecto del daño por humedad, que a priori parece poco presente. Por otro lado, tenemos el efecto del envejecimiento⁷ del mástico. El envejecimiento es un proceso que degrada el material, pero a su inicio, debido a la rigidización del mástico, puede producir una falsa mejora de las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa (como se verá más adelante, sucede lo mismo con la resistencia a tracción indirecta).

La disminución inicial y el posterior repunte que se muestra en los resultados obtenidos, puede deberse a un reblandecimiento inicial del mástico seguido de un inicio de envejecimiento que provoca una falsa mejora en los resultados. Posteriormente, las condiciones adversas permanecen y se observa una disminución definitiva de las propiedades. Este hecho es muy notorio en la *Figura 37*. Esta figura muestra la evolución del módulo de rigidez según el número de ciclos a la temperatura de 40°C, la situación más agresiva. Aquí se observa que debido a que las probetas han estado en un entorno agresivo, a los 4 ciclos el módulo de rigidez ya ha aumentado ligeramente. Sin embargo, para 8 ciclos ya ha comenzado su descenso, mientras que para 12 ciclos se observa una caída drástica de éste, que se supone que debería seguir disminuyendo si las probetas hubieran seguido en estas condiciones durante un mayor número de ciclos.

Por otro lado, si no fijamos en las probetas sometidas al mismo número de ciclos de humedad-sequedad a diferentes temperaturas (*Figura 38*, *Figura 39* y *Figura 40*), observamos que la tendencia es la misma que la explicada anteriormente: se genera una pequeña disminución para las condiciones menos desfavorables, seguido de un pequeño repunte del valor del módulo de rigidez, para posteriormente abocar en una disminución que habría de ser definitiva.

Este efecto de envejecimiento del mástico que se produce, se solapa con el efecto del daño por humedad, por lo que no se puede apreciar con claridad la afectación de los ciclos de humedad-sequedad a diferentes temperaturas a las probetas que han sido sometidas a ellos.

⁷ Se define como envejecimiento la variación de las propiedades de los materiales, que ocurren durante periodos de tiempo más o menos largos debidos a condiciones ambientales y cambios de temperatura y que originan la degradación total o parcial de los mismos.

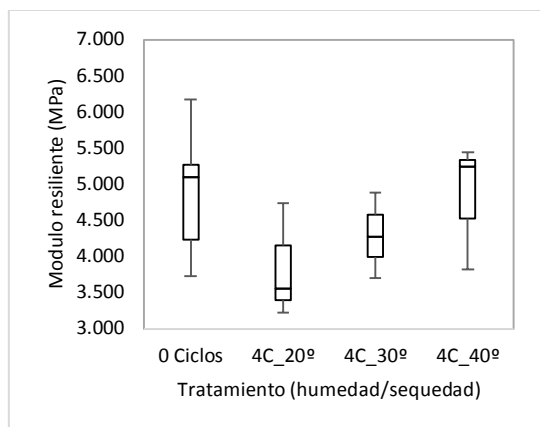


Figura 38. Módulo resiliente de las probetas sometida a 4 ciclos de humedad-sequedad, en función de la temperatura.

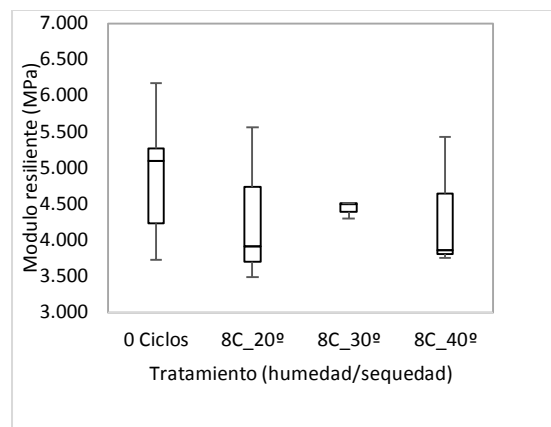


Figura 39. Módulo resiliente de las probetas sometida a 8 ciclos de humedad-sequedad, en función de la temperatura.

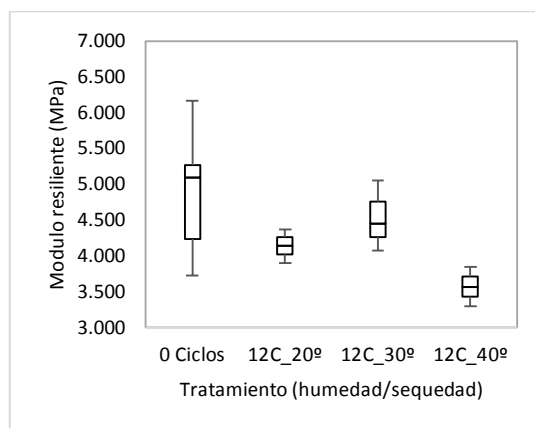


Figura 40. Módulo resiliente de las probetas sometida a 12 ciclos de humedad-sequedad, en función de la temperatura.

5.4. Ensayos de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta da como resultado una curva carga-desplazamiento. Esta curva tiene un máximo de carga que corresponde al momento en el que la probeta se fractura y se procede a la posterior descarga. El comportamiento típico de una probeta sometida al ensayo de tracción indirecta es el que muestra la *Figura 41*, que es el resultado del ensayo de las probetas inalteradas en seco. La *Figura 42* muestra también el resultado de las probetas de la “condición 0” pero en ese caso sometidas a un ciclo de humedad-sequedad, como se explica en el apartado “4.3.4.1. Tracción indirecta en las probetas de “condición 0””.

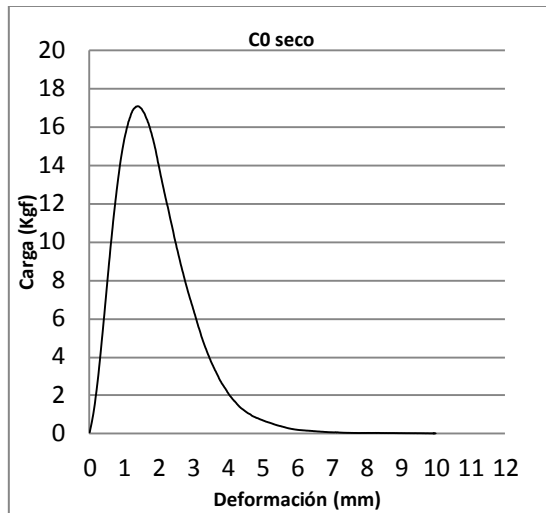


Figura 41. Resultado del ensayo de tracción indirecta en las probetas de la “condición 0” en seco.

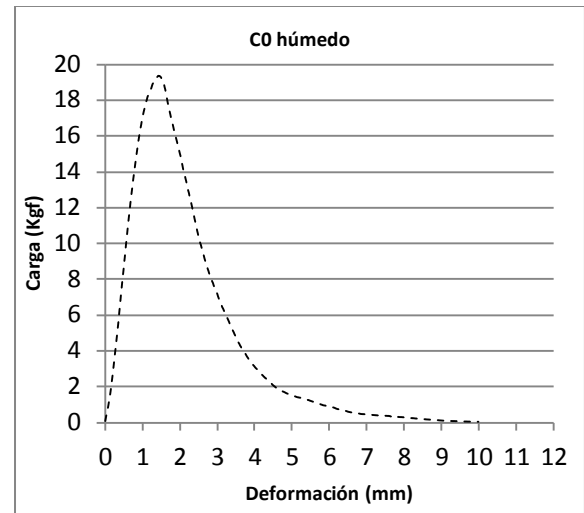


Figura 42. Resultado del ensayo de tracción indirecta en las probetas de la “condición 0” después de un ciclo de humedad-sequedad.

A continuación, se exponen los datos de los ensayos de las probetas sometidas a ciclos de humedad-sequedad y su comparación con los resultados de las probetas de la condición inicial.

En primer lugar, se debe mencionar que la densidad afecta de una manera clara a los resultados finales. A la hora de procesar los resultados, no se han tenido en cuenta aquellas probetas que presentaban una desviación en la densidad superior al 1%, para, de esta manera, obtener unos mejores resultados.

A la hora de analizar los resultados de los valores de resistencia a tracción indirecta, nos fijamos primeramente en las probetas de “condición 0” (Figura 43). Se observa que aquellas probetas que se han ensayados después de un ciclo de humedad-sequedad tienen un valor medio de resistencia a tracción indirecta superior a aquellas que no han sufrido ninguna alteración. Este hecho puede ser debido a un principio de envejecimiento del betún de las probetas que han estado sumergidas, como se ha explicado previamente. A corto plazo, este envejecimiento puede provocar un rigidización de las probetas, que sería lo que vemos reflejado en la Figura 43.

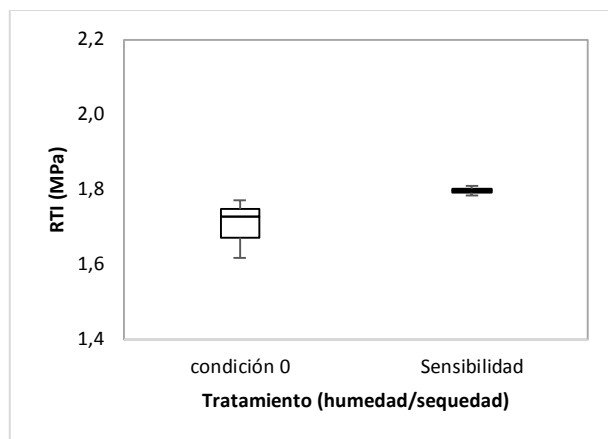


Figura 43. Resistencia a tracción indirecta en las probetas de la condición inicial, tanto las que no han sufrido ninguna alteración como las que se han sometido a un ciclo de humedad, sequedad.

Por otro lado, en las figuras *Figura 44* y *Figura 45* se muestran los resultados de los ensayos de tracción indirecta en función del número de ciclos y en función de la temperatura de los ciclos a los que se han sometido las probetas, respectivamente.

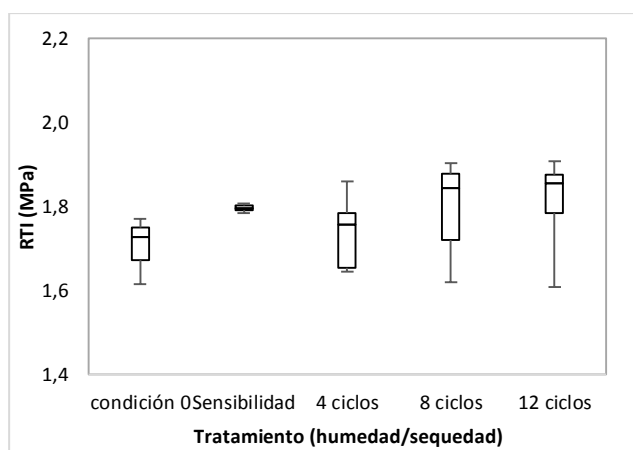


Figura 44. Resistencia a tracción indirecta en función del número de ciclos

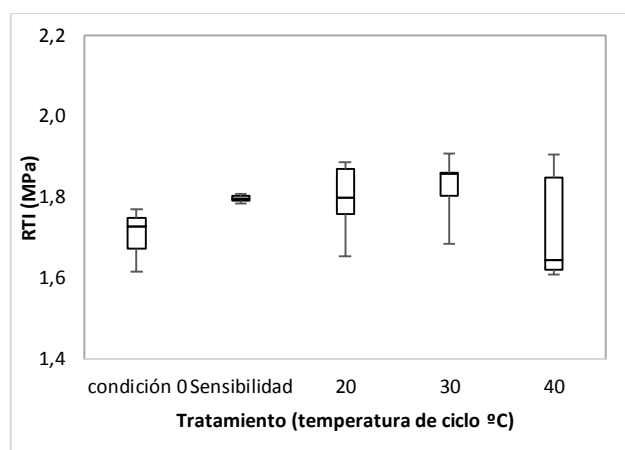


Figura 45. Resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura a la que han sido sometidas las probetas.

Analizando según el número de ciclos (*Figura 44*), se observa que los valores medios de la resistencia a tracción son todos superiores al valor medio de las probetas de la condición inicial que no han sido sometidas a ningún ciclo de humedad–sequedad.

Este hecho concuerda con lo explicado por (Apeagyei, Grenfell, & Airey, 2014) en su artículo “*Observation of reversible moisture damage in asphalt mixtures*”. Ellos realizaron un estudio que consistió en someter probetas con diferente porcentaje de huecos y diferente material de filler (granito y caliza) a una inmersión en agua a 60°C durante un período de 70 días. La principal conclusión a la que llegan es que el efecto de

la humedad es *reversible*. Después de un proceso de secado, las probetas recuperaron el 100% de la rigidez inicial. En esta línea, establecieron también que existe una relación directa entre la durabilidad de la mezcla y el contenido de huecos de la misma.

Ellos sostienen también que la rigidez disminuye con el tiempo, exceptuando en periodos cortos de exposición a la humedad, en los cuales el agua provoca ligeros aumentos en la misma. Esto es lo que nos ocurre en el presente estudio.

Sin embargo, para los valores de resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura, se observa que para 20°C y 30°C los valores medios de la resistencia a tracción siguen siendo superiores que los de la “condición 0 en seco”, pero para la temperatura de 40°C el valor medio de la resistencia a tracción es considerablemente menor que todo el resto de probetas, a pesar de que la dispersión de los valores es significativa. Por lo tanto, se puede pensar que para temperaturas más elevadas, el envejecimiento es mayor y por lo tanto las propiedades mecánicas disminuyen, tal y como sucede en el caso de los ensayos del módulo resiliente vistos anteriormente.

5.5. Ensayos Fénix

El ensayo fénix da como resultado una curva de carga–desplazamiento de la cual se obtienen posteriormente mucha información, como se explica en el apartado de metodología de los ensayos “4.3.5. *Fénix*”. La carga máxima que se alcanza en esta curva, inmediatamente antes de la rotura, depende mucho de la temperatura de ensayo, como se puede observar en la

Figura 46 y *Figura 47*. Éstas muestran los resultados de los ensayos fénix realizados a las probetas de “condición 0” ensayadas a 5°C y a 20°C respectivamente. Como se puede observar, la carga que soportan las probetas es mucho mayor cuando la temperatura es más baja. Esto se debe a una disminución de la ductilidad del mástico con la temperatura, teniendo un comportamiento más frágil cuanto menor es la temperatura (Pérez-Jiménez, Botella, Martínez, & Miró, 2013).

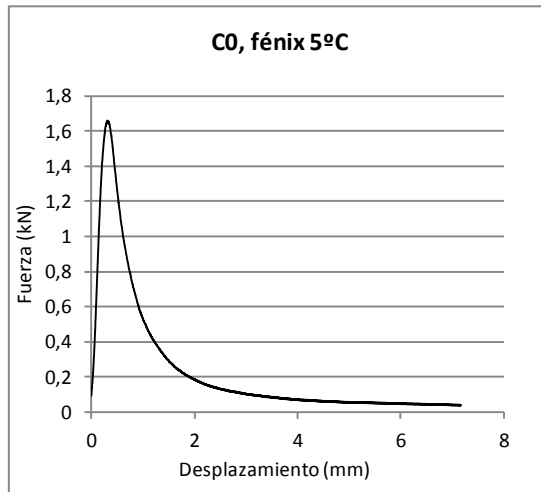


Figura 46. Curva del ensayo fénix de las probetas de “condición 0” a una temperatura de 5°C

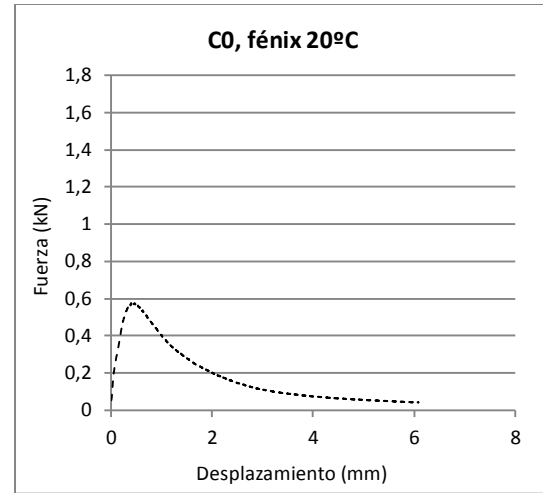


Figura 47. Curva del ensayo fénix de las probetas de “condición 0” a una temperatura de 20°C

Por otro lado, con los datos que proporciona el ensayo fénix se pueden determinar numerosos parámetros que nos sirven en el estudio de las propiedades mecánicas de la mezcla. En este caso, el estudio se centra en el análisis de la *resistencia a tracción*, el *índice de rigidez a tracción* y la *energía de fractura*.

En el caso de la *resistencia a tracción (MPa)* se ha observado que en todos los casos la resistencia a tracción de las probetas sometidas a ciclos de humedad-sequedad presenta una resistencia mayor que las probetas que no han sido sometidas a ningún ciclo. La diferencia de la resistencia máxima alcanzada por las probetas de “condición 0” y las sometidas a ciclos es más notoria cuando el ensayo se ha realizado a 5°C.

En la *Figura 48*, *Figura 49* y *Figura 50* vemos el comportamiento de la resistencia a tracción en función de la temperatura a la que han estado sometidas las probetas, y según el número de ciclos a los que han estado sumergidas.

En cambio, en la *Figura 51*, *Figura 52* y *Figura 53* observamos las variaciones de la resistencia a tracción en las probetas que han estado un mismo número de ciclos sometidas a condiciones adversas. Aquí la diferencia entre los valores de la resistencia a tracción en cada caso está provocada por la temperatura.

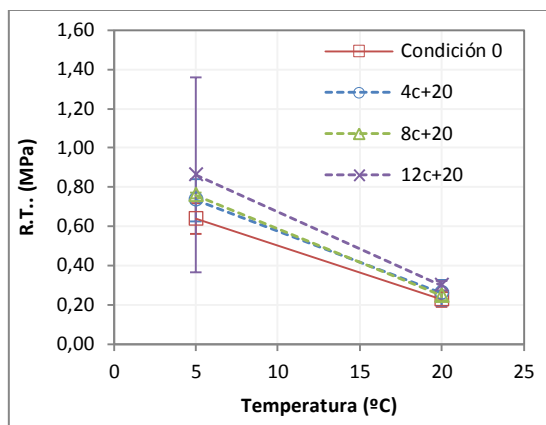


Figura 48. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según el número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

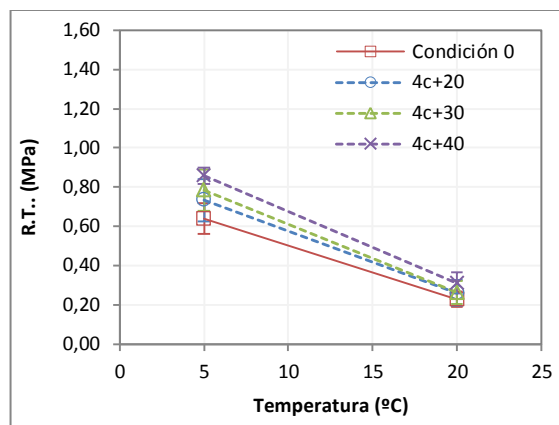


Figura 51. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

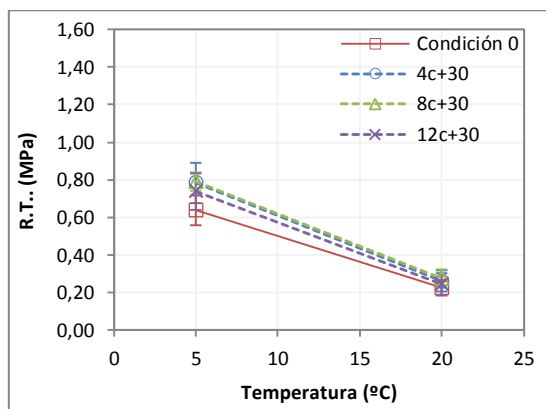


Figura 49. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según el número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

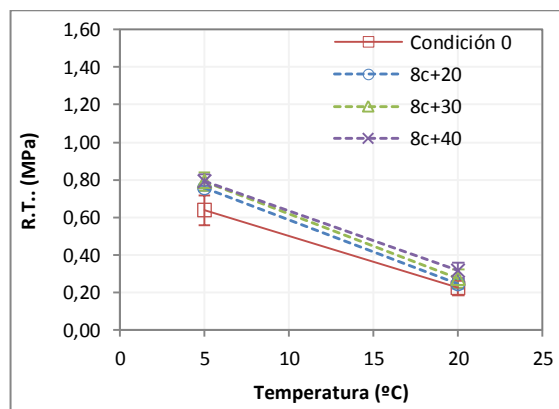


Figura 52. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada, comparadas con las probetas de condición 0.

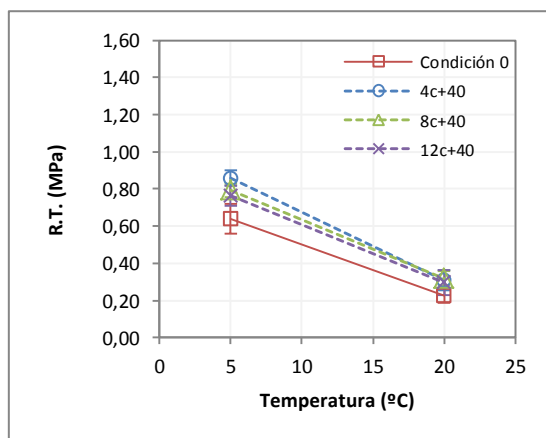


Figura 50. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°C, según el número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

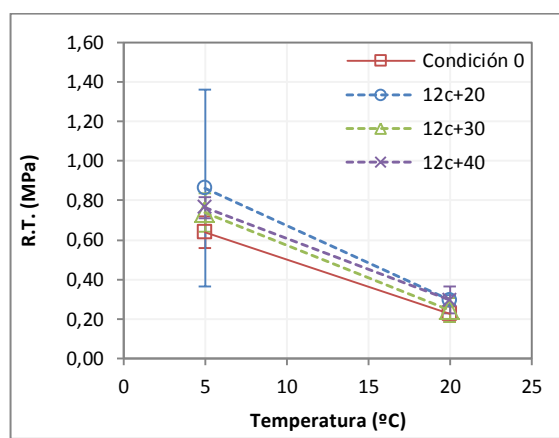


Figura 53. Resistencia a tracción de las probetas que se han sometido a 12 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

En el caso del índice de rigidez a tracción (kN/mm), hemos estudiado el índice de rigidez a tracción 25-50, lo que significa que este índice se calcula tomando los valores

entre un cuarto y un medio de la carga máxima. Eso se hace para evitar la dispersión de los resultados (Pérez-Jiménez, Botella, Martínez, & Miró, 2013).

Lo primero que nos llama la atención es que, igual que en la resistencia tracción, el índice de rigidez a tracción 25-30 (IRT 25-50) es siempre inferior en las probetas que no se han sometido a ningún tratamiento de humedad-sequedad. Sin embargo, no se aprecia una tendencia clara de aumento de ITR para un número de ciclos o una temperatura determinados.

Se observa también en este caso, que la temperatura a la que tuvo lugar el ensayo fénix influye en los resultados. Sí que es cierto que a temperatura de ensayo de 5°C los valores del IRT son mayores, como ya se ha explicado anteriormente, pero a esta misma temperatura de ensayo, las diferencias de IRT entre las probetas es mayor que en el ensayo realizado a 20°C. Sin embargo, en este caso estas diferencias entre resultados de las probetas ensayadas a una misma temperatura no son tan notorias como en el caso de la resistencia a tracción.

En la *Figura 54*, *Figura 55* y *Figura 56* se observan los valores del índice de rigidez a tracción de las probetas sometidas a ciclos de humedad sequedad a una determinada temperatura; 20, 30 y 40°C respectivamente.

En cambio, en la *Figura 57*, *Figura 58* y *Figura 59* el estudio se ha hecho teniendo en cuenta la temperatura a la que se han realizado los ciclos, por lo que las diferencias entre los valores del IRT 25-50 de las distintas figuras dependen del tiempo que las probetas han estado sometidas a ciclos de humedad-sequedad.

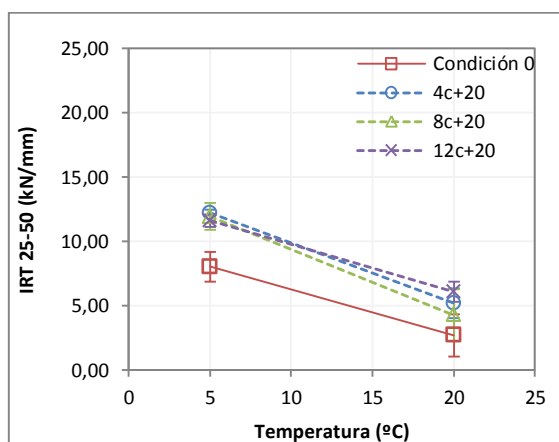


Figura 54. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

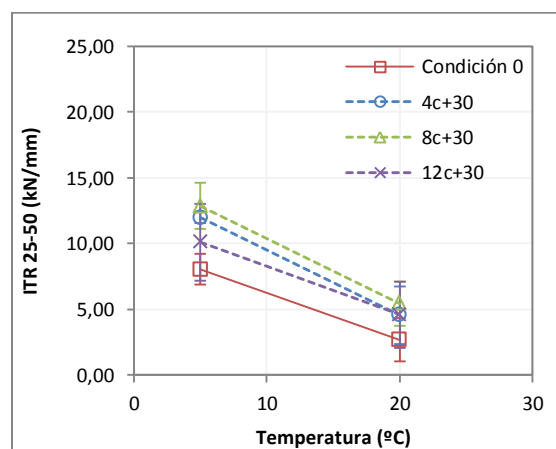


Figura 55. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

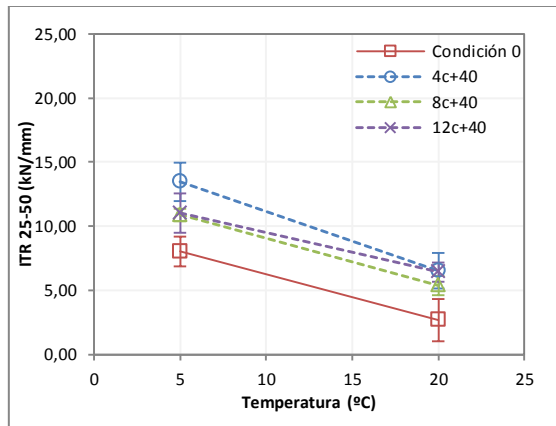


Figura 56. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°Csegún cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

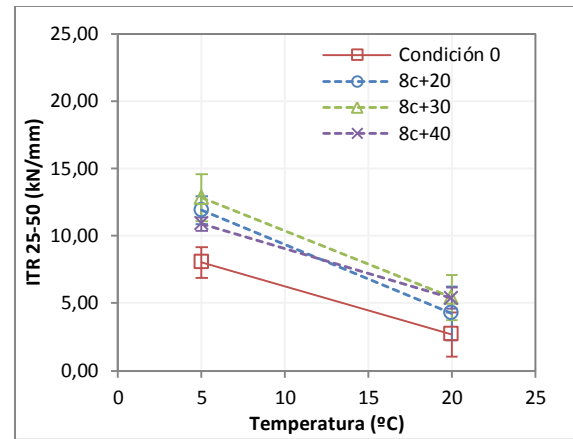


Figura 58. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

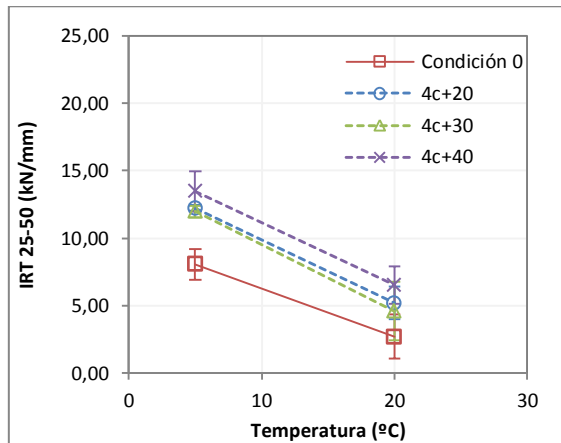


Figura 57. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

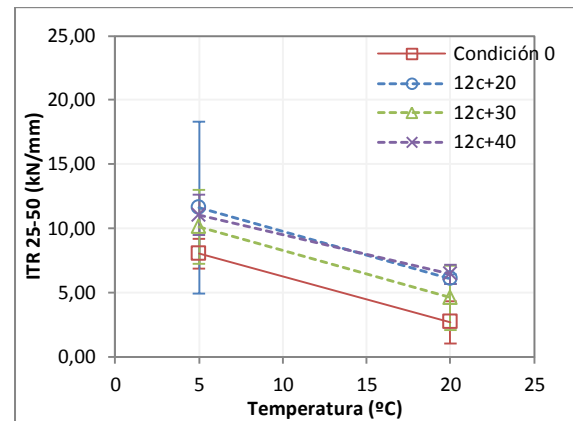


Figura 59. IRT 25-50 de las probetas que se han sometido a 12 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

El caso de la *energía de fractura* (J/mm^2) es diferente, puesto que, aunque también existe la tendencia de disminuir en las probetas de la “condición 0”, la diferencia con las probetas sometidas a ciclos no es tan exagerada como en los casos de resistencia a tracción e índice de tracción indirecta.

En la *Figura 60*, *Figura 61* y *Figura 62* se muestran los valores de la energía de fractura según la temperatura a la que las probetas han sido sometidas durante los ciclos de humedad-sequedad (20, 30 y 40°C respectivamente), responsabilizando así a la variación de los resultados en cada gráfica al periodo de tiempo de duración de estos ciclos.

En cambio, en la *Figura 63*, *Figura 64* y *Figura 65* estos cambios deben producirse a causa de la temperatura, puesto que se comparan los resultados de la energía de deformación en

probetas que han estado sometidas a condiciones de humedad durante el mismo número de ciclos (4, 8 y 12 ciclos respectivamente).

En todos los resultados se observa que los valores de energía de deformación alcanzados por las probetas que no han sufrido ninguna alteración por humedad (“condición 0”) son menores que en el resto de probetas, sin embargo, no se observa una tendencia clara de cuál es la condición que más ha afectado a los resultados, si la temperatura o el número de ciclos.

Por último, destacar que en el caso de la energía de fractura, la temperatura a la que se llevó a cabo el ensayo no ha provocado diferencias significativas en el valor de los resultados.

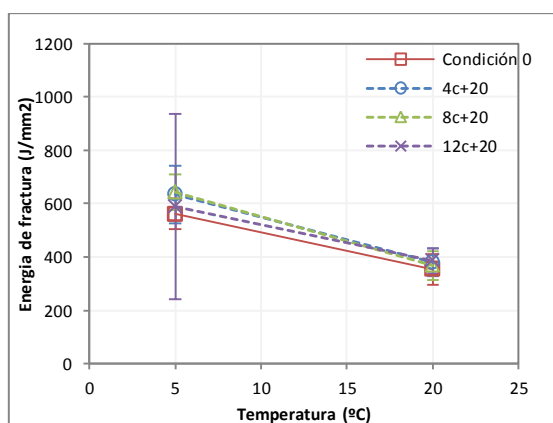


Figura 60. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

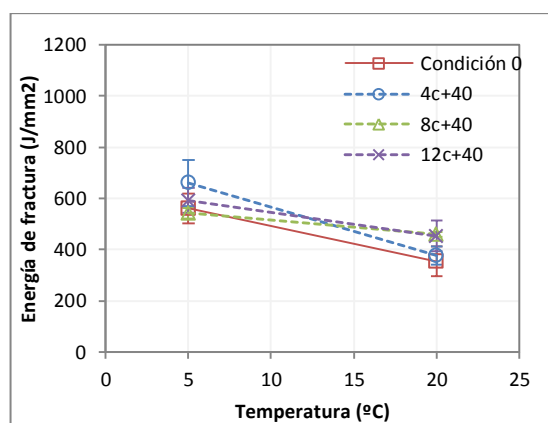


Figura 62. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

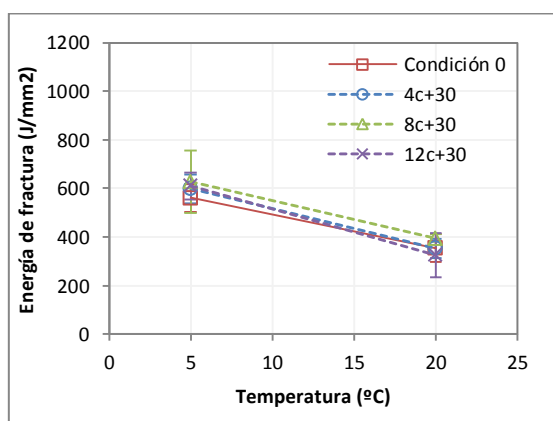


Figura 61. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

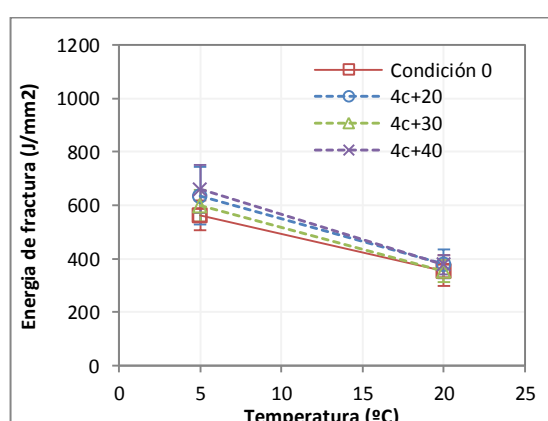


Figura 63. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

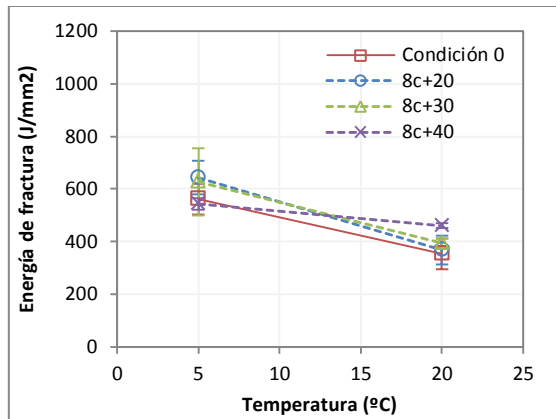


Figura 64. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

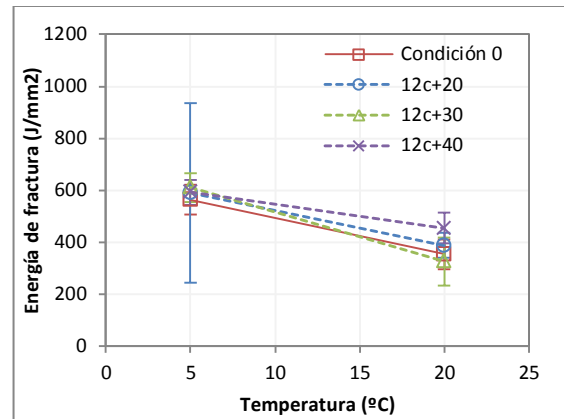


Figura 65. Energía de fractura de las probetas que se han sometido a 12 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

Por último, se presentan las curvas *energía de fractura-IRT 25-50*. Para estudiar el comportamiento de estas curvas debe realizarse un análisis en vertical. A igual rigidez y para las mismas condiciones de temperatura, la mezcla con una mayor energía será la mejor. Sin embargo, en este caso no es posible hacer esta lectura puesto que la vertical corta situaciones de diferentes temperaturas. Por lo tanto, el análisis se hace “en horizontal”. Así, para una misma energía de deformación, mientras más hacia la derecha se vaya, más rígida será la muestra que se representa.

En el caso de este estudio, se observa en el conjunto de gráficos recogidos desde la *Figura 66* hasta la *Figura 71* que con el paso de los ciclos y el aumento de la temperatura las probetas se van rigidizando. No obstante, para los casos estudiados, la energía de deformación se mantiene, a grandes rasgos, constante.

Se espera que para un número de ciclos mucho mayor al estudiado en este caso, el índice de resistencia a tracción aumente, es decir, que la mezcla sea cada vez más rígida, mientras que la energía de fractura vaya disminuyendo. En un caso extremo, se llegaría a tener una mezcla totalmente frágil.

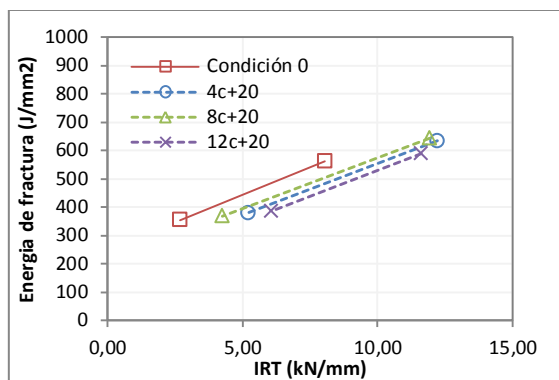


Figura 66. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 20°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

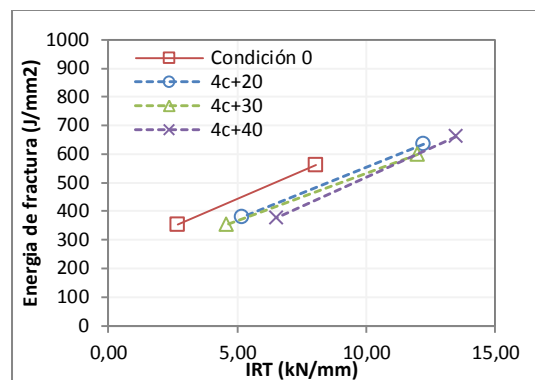


Figura 69. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a 4 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

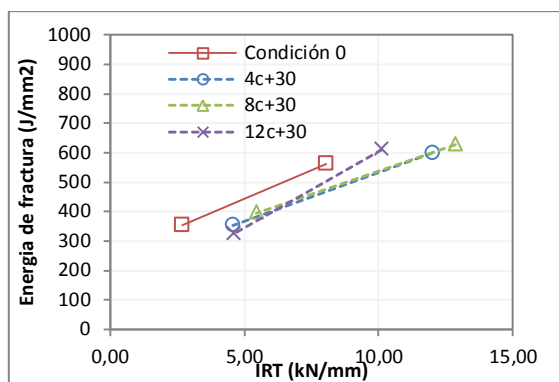


Figura 67. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 30°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

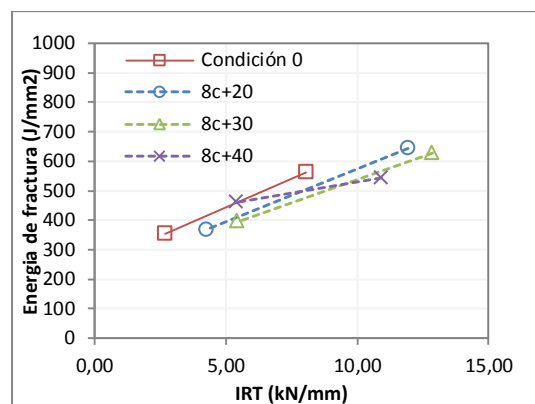


Figura 70. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a 8 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

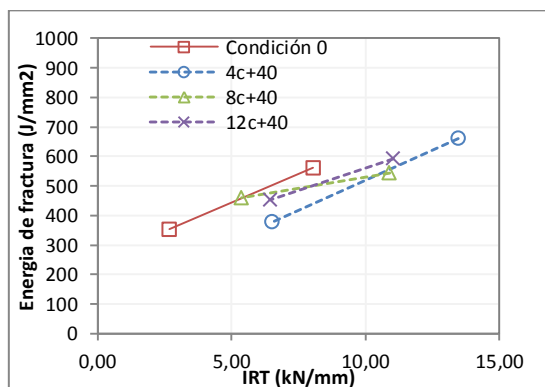


Figura 68. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a los ciclos a una temperatura de 40°C, según cada número de ciclos, comparadas con las probetas de condición 0.

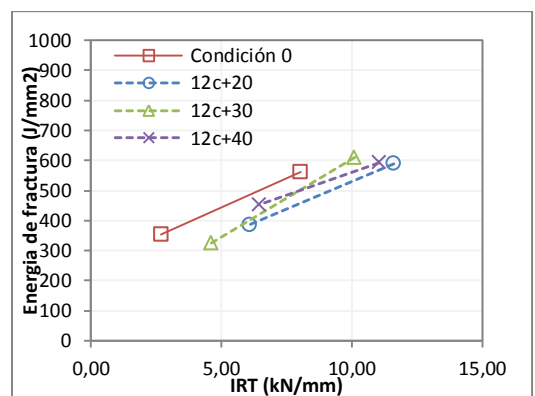


Figura 71. Curva “energía de fractura-IRT 25-50” para probetas que se han sometido a 12 ciclos de humedad-sequedad, a cada temperatura, comparadas con las probetas de condición 0.

5.6. Análisis visual de la interfase árido-betón

El análisis visual de la interfase se ha llevado a acabo inmediatamente después de los ensayos de fénix y tracción indirecta. El análisis es sencillo, simplemente consiste en observar detenidamente el área de fractura cuando se ha producido el ensayo.

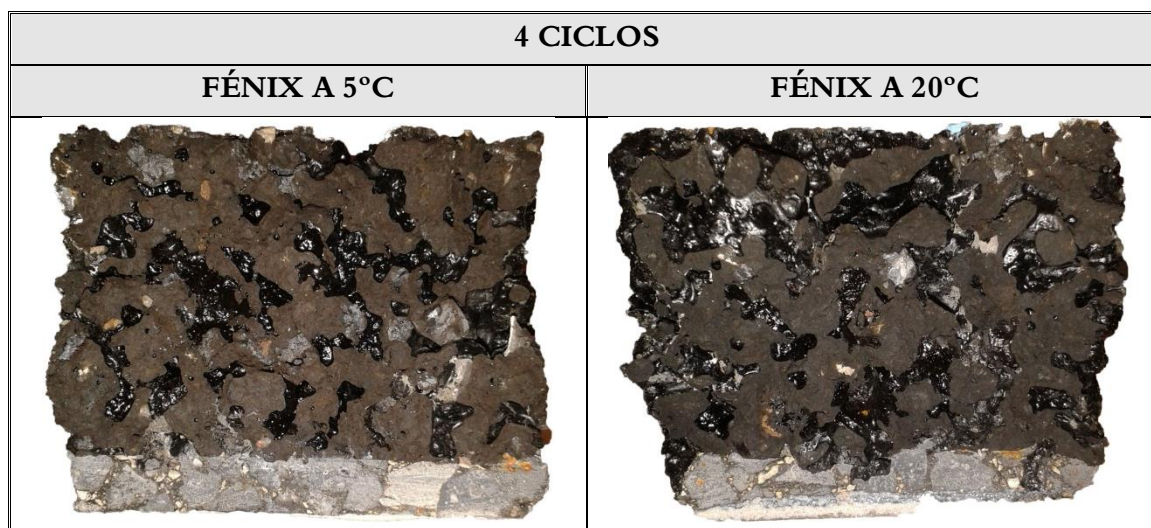
En la *Tabla 12* podemos observar el aspecto de la superficie de fractura de algunas probetas representativas. Se han elegido en todos los casos las probetas que han estado sometidas a ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 40°C, puesto que se presupone que tienen que ser las que han sufrido un daño mayor.

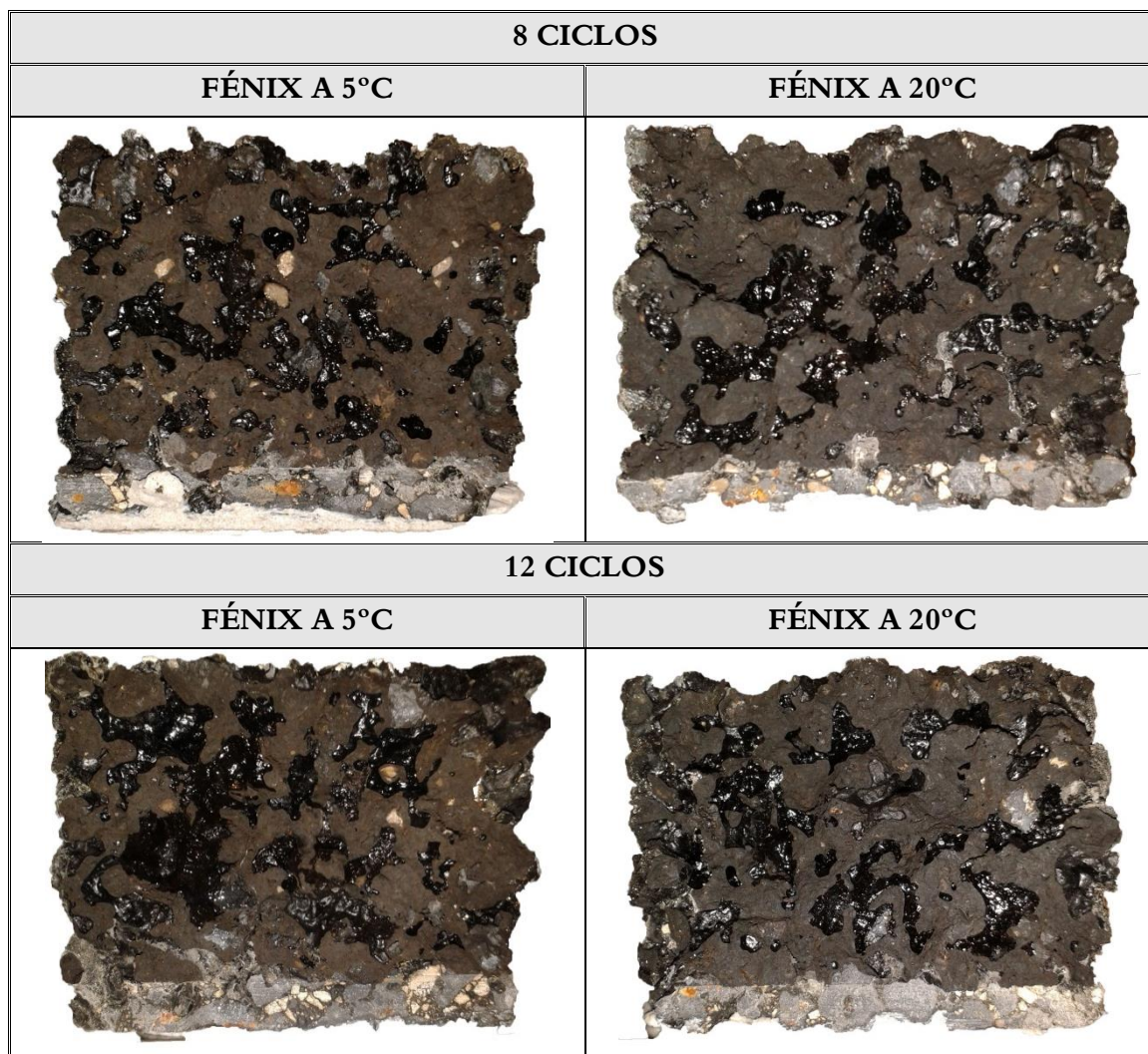
En las imágenes (*Tabla 12*) se puede comprobar de manera cualitativa que el tipo de fallo en la fractura depende de la temperatura a la que se ha realizado el ensayo. En los ensayos a 20°C se ve que principalmente lo que ha ocurrido es una pérdida de cohesión entre las partículas del mástico.

En cambio, en las probetas que se han ensayado a una temperatura de 5°C se observa, además de una pérdida de cohesión, una cantidad considerable de áridos fracturados. Esto se debe a que a bajas temperaturas, el mástico se rigidiza, y a la hora de soportar un esfuerzo se rompe el árido antes que el propio mástico.

En cualquier caso, no se aprecia un fallo por adherencia en la interfase árido-betón. Este hecho coincide con el estudio realizado por (Apeagyei, Grenfell, & Airey, 2014), explicado previamente, en el que concluyen que una exposición prolongada a condiciones de humedad provoca un fallo por cohesión.

Tabla 12. Imágenes de la superficie de fractura de varias probetas





5.7. Escáner de alta resolución de las probetas

Con el escaneado de las probetas se pretendía en, primer lugar, obtener una imagen de alta resolución para poder observar de una manera más precisa que con el análisis visual la interfase árido-betún.

Otro objetivo que se pretendía alcanzar con las imágenes obtenidas, era realizar un estudio cualitativo de la cantidad de huecos de las probetas y la manera que estos afectan en el transporte de la humedad.

En la *Tabla 13*, *Tabla 14* y *Tabla 15* se muestran las imágenes obtenidas por el escáner de alta resolución. Por lo que respecta a la interfase árido-betún, no se aprecia un daño considerable. Esto concuerda con lo que se había deducido hasta el momento y el daño sufrido se ha debido a la pérdida de cohesión entre las partículas del mástico.

Tabla 13. Imágenes de escáner de las probetas de 4 ciclos según la temperatura.

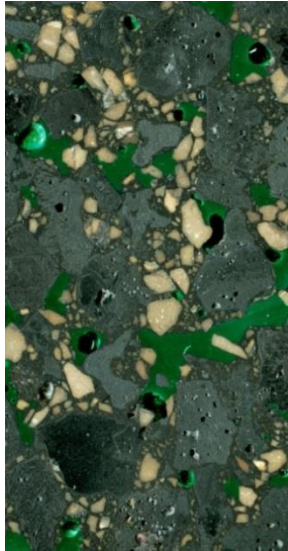
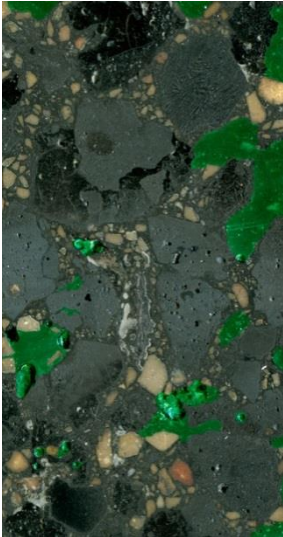

4 CICLOS		
20°C	30°C	40°C
		

Tabla 14. Imágenes de escáner de las probetas de 8 ciclos según la temperatura.


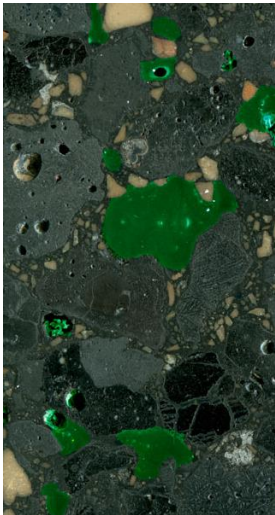
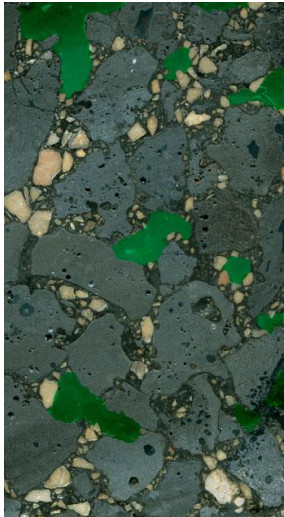
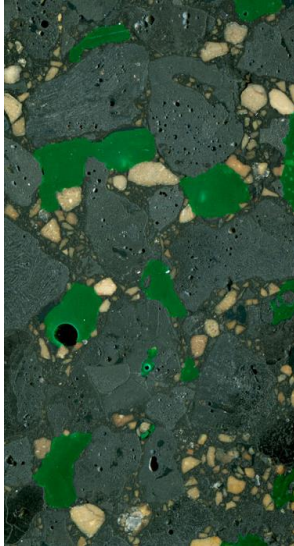
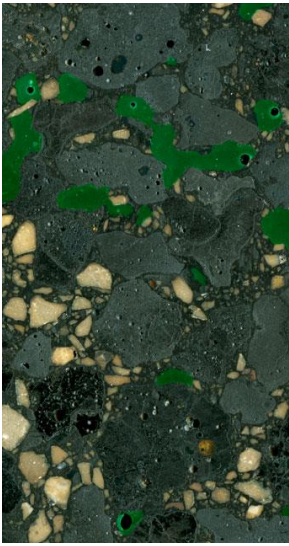
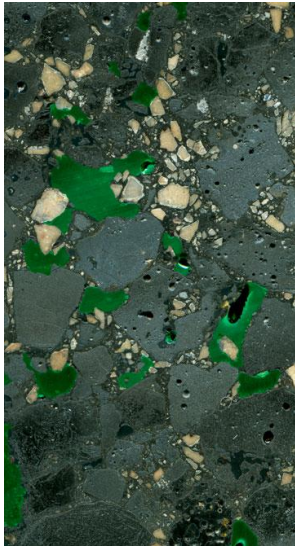
8 CICLOS		
20°C	30°C	40°C
		

Tabla 15. Imágenes de escáner de las probetas de 12 ciclos según la temperatura.

12 CICLOS		
20°C	30°C	40°C
		

Se observa, por otro lado, que la cantidad de huecos es muy elevada respecto a la cantidad de áridos que hay. Una gran parte de los huecos están aislados, aunque se observa también una parte importante de ellos que están interconectados.

Por otro lado, en el apartado “3.8.1 Mecanismos de rotura por humedad” se comenta que el transporte de la humedad depende de la distribución de huecos de la mezcla. Como se explica previamente, existe un tamaño medio de hueco, considerado como pésimo, para el que la sensibilidad a la humedad de la mezclas es máxima. Si el tamaño es menor que el tamaño pésimo, se infiltra poca agua en la mezcla; y si éste es mayor, el agua alcanza los huecos internos pero es fácilmente drenada. Sin embargo, para el tamaño de hueco pésimo, el agua permanece “atrapada” en los huecos y genera condiciones propicias para un daño por humedad (Caro Espinel, 2009).

En este caso, en primer lugar no se trata de una muestra cerrada en la que el agua apenas pudiera entrar en los huecos. Por otro lado, se ha observado a la hora de realizar los ensayos de fénix y tracción indirecta, una semana después de sacar las probetas de los baños por última vez, que éstas tenían todo su interior lleno de agua, por lo que se deduce que el agua “quedó atrapada” en los huecos del interior. Por lo tanto, no se puede decir que se trate de una mezcla que pueda drenar toda el agua de su interior fácilmente. Por

esto, es posible que pueda tratarse de un tamaño de hueco “pésimo”, causantes de los posibles daños por humedad en la mezcla. (Caro Espinel, 2009).

Con todo lo observado, se deduce que la cantidad y la forma de los huecos influyen en las propiedades mecánicas medidas.

5.8. Microscopía electrónica de barrido

En las imágenes obtenidas mediante SEM se confirma que el daño causado no afecta de manera masiva a la interfase árido–betún.

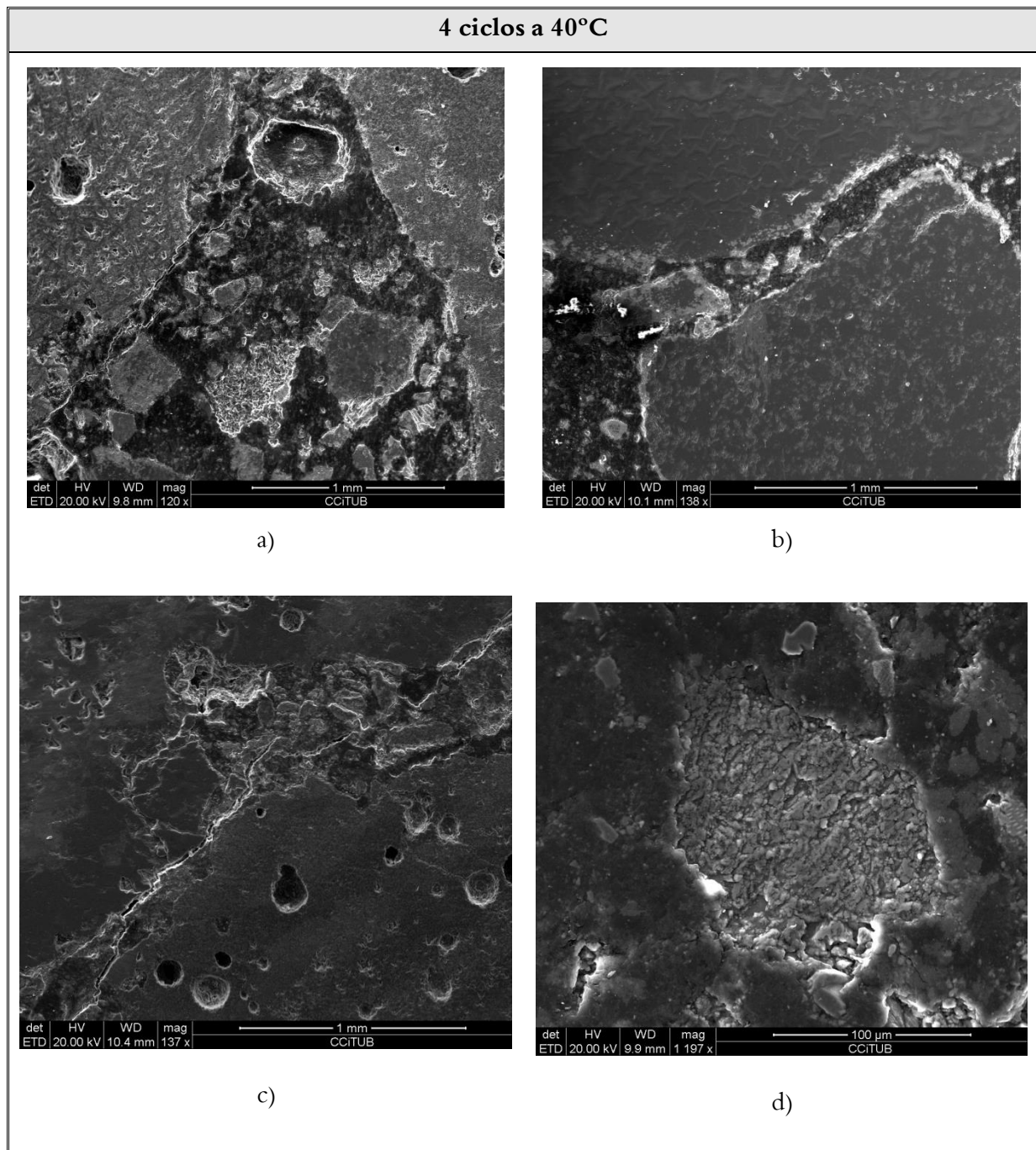
A continuación se muestran algunas de las imágenes obtenidas, aquellas más representativas, de las muestras sometidas a cada número de ciclos a una temperatura de 40°C, puesto que se presupone que son las que mayor daño han de sufrir.

En la *Tabla 16* se pueden ver las imágenes obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido de la muestra que ha estado sometida a 4 ciclos de humedad–sequedad.

En las imágenes *a)* y *c)* se observan fisuras. No obstante estas fisuras parecen ser producidas durante el proceso de compactación de la mezcla o cortado de la muestra, más que ser causadas por un daño por humedad en la interfase. En la imagen *d)* se muestra un árido calizo completamente fracturado (debido probablemente al proceso de compactación de la mezcla) rodeado de mástico.

Por otro lado, en la imagen *b)* se puede comprobar que, a pesar de que el árido siderúrgico tiene una forma mucho más angulosa que los áridos convencionales utilizados en mezclas asfálticas, el mástico es capaz de envolver de una manera correcta toda la superficie de estos áridos.

Tabla 16. Imágenes del SEM de las probetas sometidas a 4 ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 4°C.



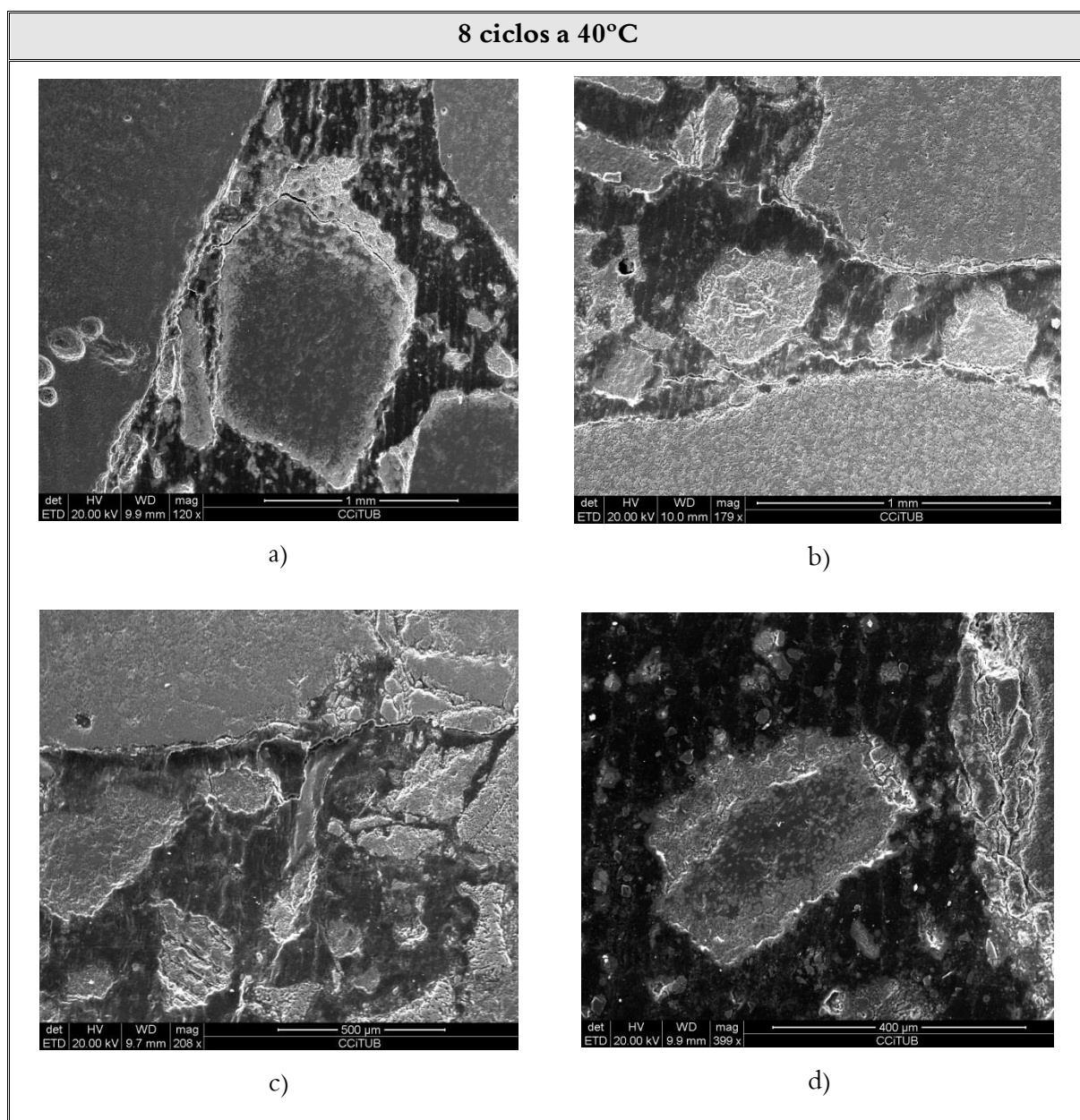
En la *Tabla 17* se muestran las imágenes obtenidas de las muestras de mezcla sometidas a 8 ciclos de humedad-sequedad a la temperatura de 40°C.

En este caso se observan algunas fisuras en la interfase árido-betún que podrían ser debidas a un daño por humedad, aunque éstas no son cuantiosas (imagen *a*)).

En general, se observan numerosas fisuras, pero todas probablemente con origen la compactación de la mezcla y la preparación de la muestra. Éstas pueden tener extensiones hacia el mástico, pareciendo fisuras por humedad, como muestran las imágenes b) y c).

No obstante, en la imagen d), se muestra un árido siderúrgico que, a pesar de estar considerablemente fracturado, la interfase no presenta ninguna señal de daño.

Tabla 17. Imágenes del SEM de las probetas sometidas a 8 ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 40°C.



En la *Tabla 18* se presentan las imágenes obtenidas mediante el microscopio electrónico de las muestras sometidas a 12 ciclos de humedad-sequedad a la temperatura de 40°C.

En este caso se observan fisuras que pueden ser debidas al daño por humedad. En la imagen *a)* se observa una fisura a lo largo de la interfase entre el árido siderúrgico y el mástico, que puede ser señal de un posible daño por adherencia; en la imagen *b)* se observa una fisura que se extiende a lo largo del mástico, lo que puede demostrar un daño por cohesión.

Sin embargo, en la imagen *c)*, y se puede generalizar a casi toda la muestra, se observa la interfase perfectamente intacta.

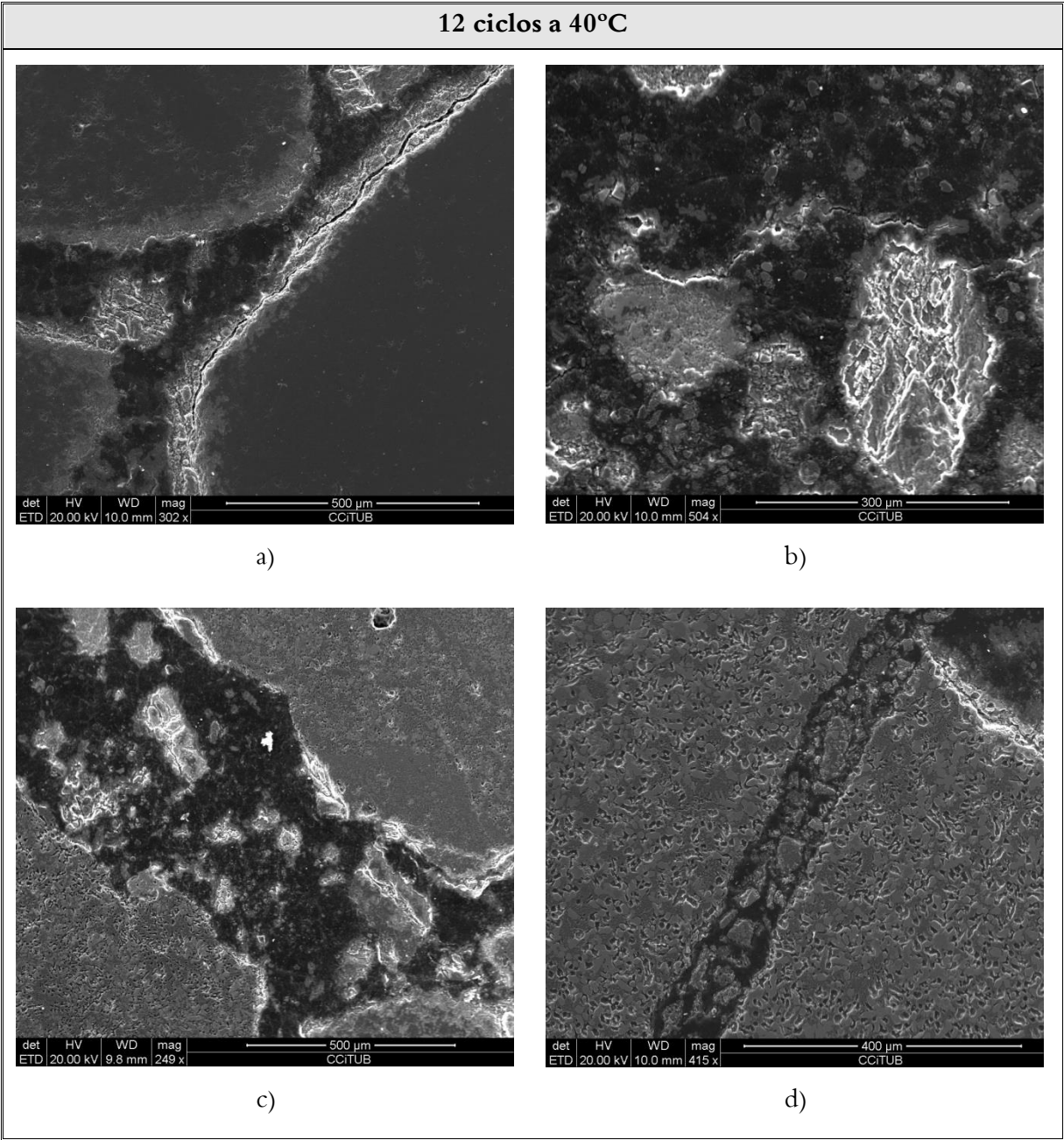
Por lo tanto, la afectación de la humedad a la mezcla no ha tenido la importancia esperada, ya que los daños mostrados por el microscopio electrónico no son relevantes.

Por último, la imagen *d)* muestra, como se ha dicho anteriormente, la eficiencia del árido siderúrgico para conformar este tipo de mezclas asfálticas, ya que el mástico lo recubre a todos los niveles.

Por lo tanto, de una manera general, se observa que el daño por humedad en la interfase árido-betún ha sido mínimo. Se observan algunas fisuras en ciertos áridos, pero su origen es, muy probablemente, debido a la compactación de la mezcla en el momento de su fabricación. También es posible que estas fisuras se hayan generado a la hora de preparar las muestras, cortándolas mediante una cortadora radial, para ser observadas por el escáner.

También se observa que el árido siderúrgico funciona bien como componente de mezcla asfáltica, ya que todas sus superficies, aunque angulosas, son envueltas por el mástico.

Tabla 18. Imágenes del SEM de las probetas sometidas a 12 ciclos de humedad-sequedad a una temperatura de 40°C.



Capítulo 6

CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio de las propiedades mecánicas de una mezcla bituminosa cuyo árido grueso ha sido árido siderúrgico y de su variación al ser sometida a varios ciclos de humedad-sequedad a unas temperaturas determinadas. Las conclusiones que se obtienen son las presentadas a continuación:

- De forma general, después de finalizar el análisis, se considera que los ciclos de humedad-sequedad a diferentes temperaturas no han tenido la afectación por humedad esperada en las probetas estudiadas. Los daños causados son menores de los que cabía esperar, aunque sí que se producen ligeras variaciones en los resultados comparados con probetas que no han sufrido ninguna alteración.
- La densidad y el contenido de huecos de las probetas influyen en los resultados de los ensayos de módulo resiliente, tracción indirecta y fénix realizados. Pequeñas variaciones en la densidad provocan gran dispersión de los resultados obtenidos.
- Con el número de ciclos, el valor del módulo resiliente de las probetas tiende a disminuir. Además, las probetas sometidas al mayor número de ciclos a una temperatura de 40°C presentan una disminución considerable del módulo resiliente.
- La resistencia a la tracción indirecta aumenta con los ciclos. No obstante, para temperaturas elevadas, se observa que la resistencia a la tracción indirecta tiene tendencia a disminuir. Por lo tanto, puede deducirse que, por lo que a la resistencia a la tracción indirecta se refiere, a medio plazo, la temperatura afecta en mayor medida que el tiempo de inmersión.
- Según los datos obtenidos en el ensayo fénix, la resistencia a tracción y el índice de rigidez a tracción de las probetas ensayadas aumentan con respecto a aquellas que no han estado sumergidas a ningún ciclo de humedad-sequedad. Esto explica un comportamiento de rigidización de la mezcla al ser sometida a ciclos. No obstante,

la energía de fractura se mantiene constante. Se cree que para periodos superiores a 12 ciclos, esta energía de fractura debe comenzar a disminuir hasta llegar a un punto en que la mezcla tendría un comportamiento totalmente frágil.

- En las imágenes tomadas mediante el SEM se observa la interfase árido-betún prácticamente intacta, afectando de una manera un poco más marcada a las probetas que han estado sometidas a un mayor número de ciclos, pero sin apreciarse un daño en la interfase considerable.

Capítulo 7

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En esta tesina se ha realizado un estudio del daño causado por la humedad en mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos. Para futuras investigaciones se refieren algunas consideraciones:

- Debido a que no se aprecia un daño por humedad significativo, se consideraría oportuno someter las probetas a diferentes ciclos de humedad-sequedad a temperaturas superiores a 40°C. A causa de la viabilidad de los laboratorios, el número de ciclos puede ser el mismo que en la presente tesina (4, 8 y 12 ciclos), pero es necesario que las condiciones sean de una agresividad superior para estudiar el efecto que el medio causa en las mezclas.
- Por otro lado, en los resultados están presentes dos efectos contrarios como son el daño por humedad, que debe deteriorar las condiciones de la mezcla, y el envejecimiento del mástico, que a corto plazo, mejora las propiedades mecánicas de la misma. Por este hecho, se cree conveniente para futuras investigaciones aislar los efectos del envejecimiento estudiándolos separadamente en probetas densas de mástico, para así comprobar los efectos que el agua y la temperatura tienen sobre éste y poder sacar conclusiones precisas sobre lo que sucede en el conjunto de la mezcla bituminosa.

Referencias bibliográficas

- Adec Global, S.L. (s.f.). *Adec Global Eco-Integració Ambiental*. Recuperado el Junio de 2014, de <http://www.adecglobal.cat/>
- Adec Global, S.L. (s.f.). *adecglobal*. Obtenido de [adecglobal: http://www.adecglobal.cat/es/](http://www.adecglobal.cat/es/)
- Apeageyi, A. K., Grenfell, J. R., & Airey, G. D. (2014). *Observation of reversible moisture damage in asphalt mixtures*. Nottingham: Elsevier.
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y., & Shalabi, F. I. (2007). *Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes*. Zarqa (Jordan): Hashemite University of Jordan.
- Barra Bizinotto, D. M. (2013). *Diseño de una mezcla bituminosa (BBTM 11B) con árido siderúrgico*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció.
- Behnood, A., & Ameri, M. (2012). *Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag*. Tehran (Iran): Elsevier B.V.
- Caro Espinel, S. (2009). *A coupled micromechanical model of moisture induces damage un asphal mistures: formulation and aplications*. . Texas: PhD Thesis. Texas A&M University.
- CEDEX . (2013). *Ficha técnica: Escorias de acería de horno de arco eléctrico*. Madrid: Ministerio de Fomento y Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente.
- CEPSA. (s.f.). *Documento: Mezclas bituminosas en caliente*. Recuperado el Junio de 2014, de https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Contenidos_comunes/Documentos/capitulo_5_1.pdf
- Coring, D. R. (2003). *Chemical and Mechanical Mechanisms of Moisture Damage in Hot Mix Asphalt Pavements*. College Station: Texas A&M University.

- Cortés, M. (2014). *Estudio del uso del árido siderúrgico en mezclas asfálticas*. Barcelona: UPC.
- Darvish Poulikakos, L. (2011). *A multi-scale fundamental investigation of moisture induced deterioration of porous asphalt concrete*. Zurich: EMPA – Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology.
- Dirección General de Carreteras. (2011). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Fistric, M., Strineka, A., & Roskovic, R. (2010). *Properties of steel slag aggregate and steel slag asphalt concrete*. Zagreb (Coatia): Institute IGH.
- Hainin, R., Yusoff, N. I., Sabri, F. M., Aziz, A. A., Hameed, A. S., & Reshi, W. F. (2012). *Steel slag as an Aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt*. Bangi (Selangor) and Skudai (Johor). Malaysia: International Scholarly Research Network Civil Engineering of Malaysia.
- Hernández Puy, J. (2007). *Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech.
- Ibrahim M. Asi, H. .. (2007). *Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes*. Jordan: NRC Canada.
- Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M. G., Sánchez Blanco, V., & del Val, M. Á. (2004). *Ingeniería de carreteras. Volumen II*. Madrid: McGraw Hill.
- Kringos, N. (2007). *Modeling of Combined Physical-Mechanical Moisture Induced Damage in Asphaltic Mixes*. Delft: Technical University Delft.
- LM INGECON. (8 de junio de 2014). *LM INGECON*. Obtenido de LM INGECON: http://lmingecon.files.wordpress.com/2014/06/seccic3b3n-perfil_v2.jpg?w=584&h=242
- Lu, Q. (2005). *Investigation of conditions for moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods*. Berkeley (California): University of California.

- Manresa i Lamarca, J. M. (2009). *Efecto del empleo de árido siderúrgico en las propiedades de las mezclas bituminosas*. Barcelona: UPC.
- METFUSION. (14 de 10 de 2013). www.metfusion.wordpress.com. Obtenido de www.metfusion.wordpress.com:
<https://metfusion.files.wordpress.com/2013/10/11-10-2013-19-51-40.jpg>
- Moraes, R., Velasquez, R., & Bahia, H. (2010). *Measuring effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strenght*. Madison: University of Wisconsin.
- Motz, H., & Geiseler, J. (2001). *Products of steel slag as an opportunity to save natural resources*. Duisburg, Germany: Elsevier Science.
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2011). *Mix desing and performance analysis of asphalt concrete with electric arc furnace*. University of Padua, Dept. of Structural and Transport Engineering. Padua, Italia: Construction and Building Materials.
- Pedrerres Ca'n Ramis, S.L. (s.f.). *Productos. Áridos para la construcción*. Recuperado el Junio de 2014, de [http://www.canramis.es/es/productes/#!galeria\[productos\]/32/](http://www.canramis.es/es/productes/#!galeria[productos]/32/)
- Pérez-Jiménez, F., Botella, R., Martínez, A. H., & Miró, R. (2013). *Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures*. Barcelona (UPC): Elsevier, Ltd.
- Sanducci, L. (2002). *Moisture sensitivity of asphalt pavements*. California: Pavement Research Center, UC Berkeley.
- Sorigué. (s.f.). *Betún BM-3c modificado con polímeros*. Recuperado el Junio de 2014, de http://www.sorigue.com/fileadmin/user_upload/sorigue/Betunes_modificados/PM B-45-80-65.pdf
- TBR, C. (2003). *Moiture Ssensitivity of Asphalt Pavements, a national seminar*. San Diego, California.
- UNESID. (2013). *La industria siderúrgica española en 2013*. UNESID.

Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). *An overview of utilization of steel slag*. Wuhan (China): Ministry of Environmental Protection of China.

Normativa consultada

- AENOR. (1996). *UNE-EN 933-2. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2003). *UNE-EN 12697-8. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación del volumen de huecos de las probetas bituminosas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2004). *UNE-EN 12697-23. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2006). *UNE-EN 12697-12. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2006). *UNE-EN 12697-35. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio*. Madrid: Aenor.
- AENOR. (2006). *UNE-EN 12697-5. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de las dimensiones máximas de las probetas bituminosas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-23. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-26. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez*. Madrid: AENOR.

- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-29. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 29: Determinación de las dimensiones de las probetas bituminosas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la muestra mediante compactador de impactos*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-35. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-38. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 38: Aparatos de ensayo y calibración*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-38. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 38: Aparatos de ensayo y calibración*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-5. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE-EN 12697-8. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8. Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2010). *UNE-EN 12697-5. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2012). *UNE-EN 12697-26. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2013). *UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 38: Preparación de la muestra mediante compactador por impactos*. Madrid: AENOR.

CRS . (2012). *Valutazione dell'effetto di immersione in acqua su una miscela*. Centro Ricerche Stradali.

Instrucción de Carreteras. (2003). *Norma 6.1 IC Secciones de Firme (Orden FOM/3460/2003)*. Madrid: Ministerio de Fomento.